

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

ANTONIO DIMAS SIMÃO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE TOPDEA NO MANEJO DA
IRRIGAÇÃO

FORTALEZA

2008

ANTONIO DIMAS SIMÃO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE TOPDEA NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Orientador: Prof. Ph.D. Adunias dos Santos Teixeira

**FORTALEZA
2008**

O47a Oliveira, Antonio Dimas Simão de
Avaliação do sensor de umidade TOPDEA no manejo da irrigação
/Antonio Dimas Simão de Oliveira. 2008
71 f. ;il. color. enc.

Orientador: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira
Área de concentração: Irrigação e Drenagem
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de
Ciências Agrárias. Depto. de Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2008.

1. Monitoramento 2. Eficiência de irrigação 3. Agricultura de precisão I.
Teixeira, Adunias dos Santos (orient.) III. Universidade Federal do Ceará –
Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola III. Título

CDD 631.587

ANTONIO DIMAS SIMÃO DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE TOPDEA NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Aprovada em: 27 de fevereiro de 2008.

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra (Conselheiro)
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. PhD. Antônio Alves Soares (Conselheiro)
Universidade Federal de Viçosa - UFV

DEDICO

A meus pais, José Freire de Oliveira e Maria José.

A minha esposa, filha e familiares em geral.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos dá força para superar as dificuldades cotidianas e inspiração para buscarmos novas conquistas.

A meus familiares, que incentivaram minha carreira de estudante e ajudaram das mais variadas formas a vencer os desafios.

A professora Irlés Mayorga, que me ensinou a cumprir os compromissos assumidos.

Ao professor Adunias, por ter me aceitado como orientado e ter disponibilizado condições favoráveis de estudo, durante todo o curso.

À Universidade Federal do Ceará, através do DENA, por ter fornecido conteúdo de qualidade para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus amigos e colegas destes sete anos de convivência dentro da universidade, que no intuito de não cometer a injustiça de esquecer o nome de alguém vou me guardar o direito de não citar nomes.

Ao CNPq por me propiciar bolsa de estudo, o que permite uma maior dedicação ao mesmo.

A banca por terem aceitado, de pronto, o convite para avaliarem meu trabalho e contribuírem para as melhorias necessárias.

Ao Projeto do CNPq, Desenvolvimento de dispositivos de comunicação sem fio para sensores de umidade do solo, aplicados em fruticultura irrigada, que possibilitou a compra de parte dos materiais necessários à realização da Dissertação.

RESUMO

OLIVEIRA, Antonio Dimas Simão de, Universidade Federal do Ceará. Fevereiro de 2008. **Avaliação do sensor de umidade topdea no manejo da irrigação.** Orientador: Adunias dos Santos Teixeira. Conselheiros: Francisco Marcus Lima Bezerra, Antônio Alves Soares.

A comunidade científica mundial, nos últimos anos, tem intensificado os estudos para mensurar os impactos causados ao ambiente pela poluição, principalmente os efeitos adversos ao ar e água. O fato de menos de 1% da água ser potável e estar disponível à superfície da terra torna a mesma um bem de conflito. Segundo a FAO até 2030 será necessário um incremento de 14% da água potável, na irrigação, a fim de suprir a demanda provocada pelo crescimento da população mundial. Um dos problemas clássicos, no manejo da irrigação, é determinar quando e quanto irrigar e no intuito de sanar tal problema, profissionais da área de engenharia buscam cada vez mais, através de pesquisas, aumentar a eficiência de irrigação. O presente trabalho teve como objetivo avaliar um sensor de umidade, do tipo capacitivo, denominado TOPDEA, no manejo da irrigação. A umidade do solo é o indicador mais básico da água em uma amostra de solo. O monitoramento da umidade do solo é um dos fatores mais importantes para manejo correto da irrigação, contribuindo de forma direta para a determinação de quando e quanto irrigar. O experimento foi realizado no Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú – Ceará, em duas áreas distintas: A primeira com banana para ensaios preliminares de campo e avaliação da equação de calibração do sensor e a segunda com melancia para o manejo da irrigação propriamente dito. Os sensores foram calibrados através de análise de regressão entre umidade e frequência produzida pelos mesmos, partindo do ponto de saturação até aproximadamente 4% de umidade. A avaliação da equação de calibração ocorreu através da comparação entre os dados dos sensores e os dados da estação meteorológica, para tempo de irrigação. O número de sensores por hectare foi analisado pela comparação entre o número de sensores por hectare e seus respectivos tempos de irrigação. O efeito geométrico da distância de instalação dos sensores, em relação aos emissores, foi analisado através do teste de médias das leituras com as respectivas distâncias de instalação. A equação de calibração para a umidade foi do tipo potencial ($\theta = 1778371018.f^{-2,3894213}$). As maiores leituras de frequência ocorreram com o sensor instalado a 25,3 cm do emissor, enquanto que as menores ocorreram a 19,85 cm. Os maiores tempos de funcionamento do sistema de irrigação ocorreram utilizando-se dois sensores por hectares, enquanto os menores tempos ocorreram utilizando-se cinco sensores por hectare. A lâmina total de irrigação utilizando-se sensores foi de 377,96 mm, o que resultou em um volume total de água igual a 532,17 m³ para todo o ciclo da cultura. A produtividade foi de 36,0 t ha⁻¹ e a eficiência do uso da água foi de 0,068 kg L⁻¹. A produtividade da água foi de 16,18 a 26,47% superior àquela obtida com o manejo da irrigação local praticado no perímetro para a cultura da melancia. Dada a característica de armazenamento do solo, deve-se fracionar a irrigação com a primeira ocorrendo nas primeiras horas da manhã. Assim, a irrigação noturna de uma grande lâmina (prática comum do Perímetro) conduz à ineficiência da irrigação. A distância entre o sensor e o emissor tem influência direta da resposta do mesmo. O sensor TOPDEA mostrou-se preciso e eficiente no manejo da irrigação.

Palavras-chave: Monitoramento. Eficiência de irrigação. Agricultura de precisão.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Antonio Dimas Simão de, Universidade Federal do Ceará. February 2008. **Evaluation of the moisture sensor topdea for irrigation scheduling**. Adviser: Adunias dos Santos Teixeira. Committee members: Francisco Marcus Lima Bezerra, Antônio Alves Soares.

The scientific community, in recent years, has intensified studies to measure the impacts to the environment caused by pollution, mainly the adverse effects to air and water. The fact that less than 1% of the global water resources is comprised of drinking water and available at the surface of the earth makes it a commodity of conflict. According to the FAO by 2030 to meet the demand caused by the growth of the world population a 14% increase in available drinking water will be required for irrigation. To meet that expectation, the classical questions of when and how much to irrigate needs to be assessed. Thus, professionals in the fields of engineering have especially focused on practices to increase the efficiency of irrigation. This study aimed at evaluating a moisture sensor, a capacitive type, called TOPDEA, in irrigation management. The soil moisture is the most basic index to quantify water in a soil, expressed in units of mass or volume. The monitoring of the soil moisture is one of the most important factors for proper irrigation management. The experiment was carried out in the Irrigated Perimeter of the Lower Acaraú Basin – Ceará, in two different fields: The first one cultivated with bananas where preliminary tests were conducted to evaluate the sensor calibration, and the second one with watermelon for irrigation scheduling. The sensors were calibrated by means of the regression analysis between moisture and frequency output of the sensors from saturation to approximately 4% moisture content. The calibration was validated by comparing resulting irrigation timing produced by scheduling the irrigation with sensors and with a weather station. The number of sensors per hectare was analyzed by analyzing the timing of irrigation for each additional sensor in the field. The effect of the placement of the sensors (position in relation to the dripper and plant) was evaluated. The calibration equation for the sensor was found to be potential ($\theta = 1778371018 f^{-2.3894213}$). The highest readings occurred with frequency of the sensor installed 25.3 cm from the emitter, while the lowest occurred at 19.85 cm. The largest irrigation time was found when two sensors were used for each hectare, while the lowest was found using five sensors per hectare. The total irrigation depth with the scheduling conducted with capacitive sensors was 377.96 mm, which resulted in a total volume of 532.17 m³ of water in the entire cycle of watermelon. Crop yield was 36.0 t ha⁻¹ and the water efficiency of 0.068 kg L⁻¹. Water productivity was 16.18 to 26.47% higher compared to the irrigation management commonly practiced in the irrigation district for watermelon. Given the characteristic of soil physics with low water storage capacity, the daily irrigation requirement must be fractioned into several irrigation pulses starting early morning and the application of the total daily requirement in one irrigation event during the night (practice commonly conduction in the district to reduce the electricity bill) should be avoided leading to inefficient of irrigation. The distance between the sensor and the emitter has direct influence on its output. The TOPDEA sensor has proven to be accurate and efficient in the management of irrigation.

Keywords: Irrigation scheduling. Irrigation efficiency. Precision farming.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Visão periférica do sensor TOPDEA	26
FIGURA 2 Sensor pronto para instalação	26
FIGURA 3 Trincheira para coleta de amostra indeformada do solo	27
FIGURA 4a Retirada da amostra	27
FIGURA 4b Acondicionamento das amostras	27
FIGURA 5 Esquema da estrutura de aço 1020 com os componentes da balança e a distribuição das cargas atuantes; eixo, mancais e rolamentos (1); contrapeso (2); coluna de solo com sensores a serem calibrados (3); célula de carga (4)	28
FIGURA 6 Equipamentos utilizados para capturar os dados da célula de carga	29
FIGURA 7 Distribuição dos sensores nas amostras para calibração	31
FIGURA 8 Estação meteorológica automática, instalada no Distrito de irrigação	33
FIGURA 9 Croqui da área experimental	34
FIGURA 10 Placa multiplexada para coleta de dados emitidos por diferentes sensores	35
FIGURA 11 Verificação das leituras, realizadas em Laboratório, para condições extremas	36
FIGURA 12 Área experimental cultivada com melancia	37
FIGURA 13 Croqui da área experimental com melancia e linhas sorteadas com sensores	38
FIGURA 14 Mensuração da distância existente entre emissores e sensores	39
FIGURA 15 Distribuição do sistema radicular da melancia	40
FIGURA 16 Horário de observação e respectiva variação no crescimento do ramo principal	42
FIGURA 17 Peso obtido em função do número do contador digital	44
FIGURA 18 Coleta de água dos emissores para avaliação do sistema	47
FIGURA 19 Contabilização do volume para determinação da vazão do sistema	47
FIGURA 20 Tempo de funcionamento do sistema de irrigação (min) em função do manejo	49
FIGURA 21 Variação da umidade segundo a camada observada e o tempo	50
FIGURA 22 Distribuição espacial do sistema radicular da melancia	53
FIGURA 23 Variação da umidade com o tempo	55
FIGURA 24 Lâmina de irrigação em função da idade da cultura	56
FIGURA 25 Monitoramento da umidade na camada de 0 a 15 cm do solo	57
FIGURA 26 Crescimento individual e médio das plantas observadas	58
FIGURA 27 Variação da umidade do solo em função do tempo	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Permissividade relativa de alguns materiais	18
TABELA 2 Análise de variância para calibração da célula de carga	43
TABELA 3 Peso médio das amostragens para determinação da densidade global da amostra	45
TABELA 4 Análise de variância para calibração do sensor, para determinação da umidade com base na frequência emitida pelo mesmo	46
TABELA 5 Tempos de funcionamento do sistema de irrigação, necessários a reposição da ETc, de acordo com a estratégia de manejo adotada	48
TABELA 6 Distancias comparativas entre emissores e sensores (e-s), emissores e plantas (e-p) e sensores e plantas (s-p)	51
TABELA 7 Teste de comparação de médias para distâncias dos sensores aos emissores	52
TABELA 8 Tempo de funcionamento do sistema de irrigação com base no número de sensores a serem utilizados por hectare e a média de distância entre emissores e sensores (e-s)	53
TABELA 09 - Comparação entre médias, para tempo de irrigação, segundo o número de sensores por hectare	54
TABELA 10 - Crescimento do ramo principal em função do tempo	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	O solo	15
2.2	A umidade	16
2.3	A capacitância	19
2.4	Sensores capacitivos	20
2.5	Balanco hídrico do solo	21
2.6	Distribuição espacial do sistema radicular	23
2.7	A cultura	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Área de estudo	25
3.2	Ensaio preliminares, a campo, para o uso do sensor TOPDEA no manejo da irrigação	25
3.2.1	O sensor TOPDEA	25
3.2.2	Calibração dos sensores	26
3.2.3	Validação da equação de calibração, a campo, do sensor TOPDEA em relação ao balanço hídrico do solo	31
3.2.3.1	Avaliação do sistema de irrigação da área experimental com bananeira	31
3.2.3.2	Balanco hídrico com sensores de umidade de solo TOPDEA (BHS)	31
3.2.3.3	Balanco hídrico do solo com base nos dados climatológicos (BHC)	32
3.2.3.4	Conversão dos dados	33
3.2.3.5	Área experimental	34
3.2.3.6	Acompanhamento da umidade	34
3.2.3.7	Pré-teste	35
3.3	Avaliação do manejo da irrigação utilizando-se o sensor TOPDEA	36
3.3.1	Área experimental	37
3.3.2	O sistema de irrigação	37
3.3.3	Distribuição e instalação dos sensores no campo	38
3.3.4	Avaliação do efeito geométrico de instalação	39
3.3.5	Avaliação da distribuição espacial das raízes	40
3.3.6	A cultura	40
3.3.7	Avaliação do número de sensores por hectare, necessário ao manejo da irrigação	41
3.3.8	Avaliação da estratégia de manejo	41
3.3.9	Marcha de crescimento e absorção da cultura	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Calibração dos sensores	43
4.1.1	Calibração da balança	43
4.1.2	Obtenção da umidade	44
4.2	Ensaio preliminares, a campo, para uso do sensor TOPDEA no manejo da irrigação	46
4.2.1	Avaliação do sistema de irrigação por microaspersão	46
4.2.2	Análise comparativa entre BHS e BHC	48

4.2.3	Acompanhamento da umidade	49
4.3	Avaliação do manejo da irrigação com base no sensor TOPDEA	50
4.3.1	Avaliação do sistema de irrigação	50
4.3.2	Distribuição e instalação dos sensores no campo	50
4.3.3	Avaliação do efeito geométrico de instalação	51
4.3.4	Avaliação da distribuição espacial das raízes	52
4.3.5	Avaliação do número de sensores por hectare, necessário ao manejo da irrigação	53
4.3.6	Avaliação da estratégia de manejo	54
4.3.7	Marcha de crescimento e absorção da cultura	57
5	CONCLUSÕES	60
6	RECOMENDAÇÕES	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICES	67

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a comunidade científica mundial tem intensificado os estudos dos impactos ambientais provocados pelos seres humanos. Dentre os assuntos pesquisados a poluição e seus malefícios ocupam posição especial não só por danos a saúde, mas também pelos impactos provocados ao ar e às águas. O fato de menos de 1% da água ser potável e estar disponível na superfície da Terra, torna este um bem de conflito.

É fato que o primeiro setor a receber cortes no fornecimento de água, caso venha ser necessário, é a agricultura irrigada devido sua elevada demanda o que colocaria a economia em um dilema: com menos água para produzir, menor a oferta e a continuidade do fornecimento de alimentos o que teria como consequência imediata a elevação dos preços.

Segundo dados da FAO (2007), até 2030 será necessário um incremento de 14% da água doce na irrigação para suprir a demanda por alimentos, devido o crescimento na população mundial. O aumento da demanda por água pode ser possibilitado evitando-se o desperdício, desta forma, quando se pretende irrigar uma área, deve-se considerar que o fornecimento preciso de água, além de reduzir os impactos ambientais negativos em decorrência de possível salinização e contaminação do lençol freático pela lixiviação de compostos químicos, pode ainda reduzir os custos de energia como consequência do decréscimo das horas de bombeamento. O uso racional da água poderá propiciar uma expansão da área irrigada em função da maior disponibilidade deste recurso.

Um dos problemas clássicos que envolvem o manejo da irrigação é a determinação de quando e quanto irrigar. A escolha do momento de irrigar requer a consideração de algumas variáveis como: fatores do clima, tipo e estágio de desenvolvimento da cultura e capacidade de armazenagem de água no solo.

Para melhorar a qualidade da aplicação de água via irrigação, não basta ter em mãos equipamentos modernos e com alto potencial de eficiência. É necessário que haja, por parte do usuário, o conhecimento de estratégias de um manuseio correto afim de evitar que a eficiência de aplicação se torne inadequada.

Na intenção de buscar soluções que otimizem a irrigação, profissionais da área de Engenharia Agrícola desenvolvem, cada vez mais, pesquisas tanto para aumentar a eficiência dos

sistemas de irrigação como estratégias de manejo, no intuito de fornecer a quantidade exata de água à necessidade hídrica das plantas. Uma das linhas de pesquisas é a utilização de sensores, que através das propriedades físicas e químicas do solo e da água conseguem determinar, de forma indireta a umidade atual do solo.

Pelo exposto acima, o presente trabalho teve como objetivo geral a avaliação do uso do sensor capacitivo, TOPDEA no manejo da irrigação e como objetivos específicos:

1. Validar a campo a equação de calibração para umidade, obtida em laboratório, tomando como base o balanço hídrico do solo;
2. Comparar os dados de produção obtidos, com base nos dados de recomendações técnicas locais;
3. Avaliar a influência das distâncias de instalação dos sensores em relação aos emissores do sistema de irrigação; e
4. Quantificar o número ideal de sensores por hectare.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A irrigação é uma prática agrícola que visa aumentar a produtividade das culturas, ao fornecer água na quantidade certa, no momento certo e com boa qualidade de aplicação. O conhecimento da distribuição da água aplicada e a intensidade de aplicação são fatores muito importantes no planejamento racional de um sistema de irrigação (OLITTA, 1987).

2.1 O solo

O solo é um dos componentes que possui ação direta na eficiência de irrigação, pois suas características físicas e químicas influenciam tanto na armazenagem como na disponibilização da água às plantas.

O solo é um material natural, sólido e poroso, que abriga em seus poros quantidades variáveis de uma solução aquosa composta de vários eletrólitos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc.) e outros componentes denominada água ou solução do solo, além de uma solução gasosa denominada ar do solo composta principalmente de N_2 , O_2 , vapor d'água, CO_2 e pequenas quantidades de outros gases (LIBARDI, 1999).

Basicamente, existem dois processos que explicam a retenção de água pelos solos; no primeiro a retenção ocorre nos microporos dos agregados e pode ser ilustrada pelo fenômeno da capilaridade, porém não se pode afirmar que o solo é um simples tubo capilar e sim, uma composição irregular de poros e canais formados pelos sólidos. No segundo processo, a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo devido à adsorção. De acordo com Libardi (1999), é sempre possível expressar a afinidade do solo pela água como equivalente a uma altura de ascensão da água no tubo capilar.

O aumento pronunciado da superfície exposta com a diminuição do diâmetro da partícula é o ponto-chave para designar as propriedades do solo, o que terá influência direta nas propriedades de retenção de água e de nutrientes (REICHARDT, 1987).

2.2 A umidade

Segundo Libardi (1999), a umidade do solo é o índice quantificador mais básico da água numa dada amostra de solo e, tradicionalmente, tem sido expressa a base de massa (u) e a base de volume (Θ).

A umidade do solo pode ser relacionada de forma relativa a parâmetros como: massa de sólidos, massa do solo, volume de sólidos, volume do solo e volume dos poros. A Equação 1 representa a relação entre volume de água do solo e o volume total do solo (KLAR, 1988):

$$\theta = \frac{V_{\text{água}}}{V} \quad (1)$$

onde θ é a umidade volumétrica ou volume molhado, $V_{\text{água}}$ é o volume de água contido em uma amostra de solo e V é o volume total da amostra de solo.

O uso da umidade volumétrica em detrimento da umidade a base de massa, torna-se mais conveniente devido ao fato de ser mais adaptável a contabilização dos fluxos e as adições e subtrações de água ao solo. Outra razão é o fato do θ representar a razão de lâmina de água do solo, ou seja, a lâmina de água por unidade de profundidade de solo (HILLEL, 1980).

O monitoramento da umidade do solo é um dos fatores mais importantes para manejo correto da irrigação, contribuindo de forma direta para a determinação de quando e quanto irrigar. A determinação da umidade do solo é essencial para estudos de movimento e disponibilidade de água no solo, erosão, manejo da irrigação e muitos outros processos (BERNARDO et al., 2007). A umidade do solo é extremamente variável com o tempo, aumentando com a chuva ou com a irrigação e diminuindo com a drenagem ou com a evapotranspiração (REICHARDT, 1987). As propriedades do solo, as práticas culturais e de manejo do solo, a quantidade e intensidade de aplicação de água e o estágio de desenvolvimento das culturas também são fatores que afetam a umidade do solo (PALTINEANU & STARR, 1997).

São diversos os métodos utilizados na determinação da umidade do solo, no entanto, nenhum deve ser considerado como o melhor; a escolha do método dependerá dos objetivos desejados pelo pesquisador e/ou produtor, da instrumentação disponível, do nível de precisão desejada, e outros fatores que possam limitar a sua escolha (COELHO, 2003).

Klar (1988) afirma que todos os métodos utilizados na determinação da umidade do solo apresentam limitações, ou quanto à precisão, ou por serem dispendiosos, ou excessivamente morosos.

Libardi (1999) também comenta que todos os métodos apresentam as limitações citadas anteriormente, ou ainda, elevado nível de complexidade de alguns métodos.

Segundo Miranda; Pires (2001), a escolha do método irá depender de suas limitações que podem ser a baixa precisão, alta complexidade, ou exigência de equipamentos que não estejam disponíveis. Estes autores classificam os métodos em diretos e indiretos.

Como o próprio nome diz, os métodos diretos permitem a determinação direta da umidade do solo, sendo o principal, o método gravimétrico. Tal método consiste na coleta de um determinado volume de solo a campo (massa úmida), que posteriormente será submetida a temperaturas de 105 – 110 °C por um período de 24 h à 48 h para obtenção da massa dos sólidos do solo. A umidade é então determinada pela diferença entre as duas medidas dividida pela massa dos sólidos. O método gravimétrico tem como limitações a morosidade da obtenção dos resultados e a necessidade de intensa mão-de-obra (LEY et al., 1994).

Já os métodos indiretos baseiam-se em propriedades químicas ou físicas do solo, que são função do conteúdo de água, ou seja, tomam como base a moderação de nêutrons, a resistência à passagem de uma corrente elétrica, a constante dielétrica ou a tensão da água no solo. Grande parte destes necessita de calibração. Dentre estes se destaca o método da resistência elétrica onde o equipamento responsável pela medida da resistência elétrica do solo é constituído basicamente de dois eletrodos inseridos em um bloco poroso, que pode ser de gesso, nylon ou fibra de vidro (KLAR, 1988). A umidade do solo é medida em função da resistência do solo à passagem de uma corrente elétrica, sendo a resistência obtida de forma indireta, utilizando-se a Lei de Ohm e uma ponte de Wheatstone. Sendo assim, solos úmidos oferecem menor resistência que solos secos. Segundo Yoder et al. (1998), a faixa de umidade do solo medida com este aparelho vai de 10 kPa a 1500 kPa, intervalo aproximado entre capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente. Klar (1991) encontrou resistências para um solo saturado de aproximadamente 450 Ω , para solo em capacidade de campo de 620 Ω e para solo em ponto de murcha permanente de 25 k Ω . Segundo Miranda; Pires (2001), a grande vantagem deste método seria a praticidade e rapidez na determinação da umidade. No entanto, apresenta pequena

durabilidade no solo devido à solubilidade do gesso, mesmo quando envolvido por camada protetora de nylon.

Outro método que merece destaque é o método da constante dielétrica que é a medida da capacidade de um material, não condutor, de transmitir ondas elétricas de altas frequências ou pulsos. Segundo Ruth (1999), a constante dielétrica do solo seco varia entre 2 e 5, enquanto que a constante dielétrica da água é aproximadamente 80. Portanto, pode-se dizer que a constante dielétrica do solo é diretamente proporcional ao conteúdo de água no mesmo. Baseados neste princípio, dois tipos de equipamentos foram desenvolvidos para determinar o conteúdo de água no solo, a sonda de capacitância (FDR) e o reflectômetro no domínio do tempo (TDR). A sonda de capacitância determina a constante dielétrica do solo medindo diretamente a capacitância de uma configuração especial de eletrodos (PLATER, 1955; THOMAS, 1966), ou mede o avanço de frequência em comparação com um controle (WOBSHALL, 1978). Segundo Ruth (1999), nestes dispositivos o solo funciona como parte do material dielétrico do capacitor.

Qualquer material puro ou composto pode ser definido por suas características físicas (massa, volume, temperatura, umidade, etc.). Desta forma, o comportamento dielétrico de um dado material é descritível pela sua permissividade (ϵ ($F \times m^{-1}$)), ou como é mais conhecida, permissividade relativa (ϵ_r). A visualização da Tabela 01 mostra a permissividade relativa (constante dielétrica) de alguns materiais: ar, água e alguns minerais.

Tabela 1 Permissividade relativa de alguns materiais.

Material	Permissividade relativa
Ar	1
Água (20 °C)	80
Gelo (- 3 °C)	3
Basalto	12
Granito	7 a 9
Silte seco	3,5
Areia seca	2,5

Fonte: NOBORIO, 2001.

2.3 A capacitância

A capacitância do solo está relacionada com a constante dielétrica pela geometria do campo elétrico estabelecido ao redor dos eletrodos. Os dispositivos formados por placas de eletrodos podem ser cravados diretamente no solo (PLATER, 1955) ou dentro de um tubo de acesso (DEAN et al., 1987). Ley et al. (1994), lembram que se a sonda for corretamente calibrada e se a instalação do tubo for cuidadosa, sua precisão pode ser boa, e cita como principal vantagem a capacidade de fornecer medidas repetidas em um mesmo local e profundidade. Yoder et al. (1998), avaliando diversos equipamentos utilizados para medir a umidade em dois tipos de solo, arenoso e argiloso, obtiveram para estes solos curvas muito parecidas, quando fornecidas pelas sondas de capacitância, o que indica a pequena dependência destes dispositivos ao tipo de solo; o mesmo não ocorreu quando da comparação das curvas geradas pelos sensores de resistência elétrica. Ruth (1999), desenvolveu um capacitor com o objetivo de monitorar a umidade utilizando dois tipos de solo, franco argiloso e franco arenosa, não encontrando diferença significativa na relação constante dielétrica versus tipo de solo.

O conteúdo de umidade do solo pode ser determinado por intermédio do efeito na constante dielétrica ao medir-se a capacitância entre dois eletrodos implantados dentro do solo. Como a umidade do solo está predominantemente sob a forma de água livre e há uma diferença muito grande entre a constante dielétrica do ar e da água, a variação da constante dielétrica é diretamente proporcional à variação da umidade (ZAZUETA; XIN, 1994).

Os métodos de caracterização da constante dielétrica são amplamente usados para medição da permissividade do solo (ϵ_s) *in loco*, sendo os mais comuns os sensores capacitivos e os reflectômetros de domínio do tempo (TDR's).

A correlação entre a umidade no solo e a constante dielétrica medida pelas sondas não é direta envolvendo duas etapas: a primeira mede a capacitância do solo e a segunda relaciona a permissividade com a umidade do solo (DOBSON et al., 1985 apud ROTH; MALICKI; PLAGGE, 1992; WANG; SCHMUGGE, 1980 apud TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980). O estabelecimento da relação entre a constante dielétrica medida pelo dispositivo e as propriedades dielétricas médias no volume de solo de interesse está implicitamente incluído na calibração a campo (CHANZY et al., 1998).

2.4 Sensores capacitivos

Os sensores capacitivos têm por base o uso de um capacitor e frequencímetro em um circuito RC, onde a frequência de oscilação do circuito depende do teor de água no solo onde o mesmo está inserido.

Considerando um capacitor de placas paralelas e planas, obtém-se a capacitância pela Equação 2.

$$C = \xi * \frac{ab}{d}, \quad (2)$$

sendo ab , a área das placas; d , a distância que as separa e ξ , a permissividade do meio. A capacitância é medida em Farads ($C V^{-1}$ ou $C^2 (N m)^{-1}$). A unidade de capacitância é o Farad (F), pois a permissividade é medida em $F m^{-1}$ (DURNEY, 1985; HICKEY, 1961).

Nadler & Lapid (1996) afirmam que existe a necessidade da disponibilização de dispositivos para medir a umidade do solo com acurácia, a preços acessíveis e estrategicamente convenientes, que substituam o uso da sonda de nêutrons. Além disso, características como equipamentos mais leves, instalação permanente, rápida resposta, ausência de efeitos radioativos e pouco erro aleatório de contagem associado tornam os sensores capacitivos bem mais vantajosos que os nucleares tradicionais.

Cary & Fisher (1983) relatam que sensores baseados na medição da constante dielétrica por reflectometria no domínio do tempo ou por sondas capacitivas são bastante atrativos, pois esses dispositivos podem ser automatizados e deixados a campo de forma segura e sem a exigência de cuidados especiais. A sonda capacitiva possui propriedades bem mais interessantes que o TDR para a instrumentação quando as medições de umidade do solo são automatizadas. Os eletrodos das sondas podem ser facilmente instalados na profundidade requerida sem perturbar o solo com escavações de buracos. A limitação é o tamanho da esfera de influência, definida pelo volume de solo na circunvizinhança dos eletrodos da sonda, influenciando a medição da capacitância, pois é pequena e se define como a região imediatamente ao redor dos eletrodos. A dimensão da esfera de influência depende do tamanho do eletrodo. Gaudu et al. (1993) apud Chanzy et al., (1998) demonstraram experimentalmente

que o volume explorado pela sonda capacitiva está limitado a alguns centímetros em torno dos eletrodos.

Segundo Yoder et al. (1998) o desenvolvimento de sensores para monitoramento da umidade do solo seguiu um critério que demandou pouco esforço no manuseio, não requereu amostragem destrutiva (depois de instaladas no solo) e adaptação às medições elétricas e ao registro dos dados.

2.5 Balanço hídrico do solo

O manejo da irrigação também pode tomar por base o balanço hídrico no solo pois segundo Reichardt (1987), como o nome deixa explícito, contabiliza todas as adições e retiradas de água que realmente ocorrem em dada área, utilizada na produção agrícola, permitindo avaliar a situação hídrica pela qual uma cultura passa fornecendo critérios mais precisos para definir quando e quanto irrigar.

Através do plano de superfície do solo, tem-se a adição da chuva (P) e/ou irrigação (I), e as perdas por evapotranspiração (ET) e enxurradas (RO). As eventuais perdas por drenagem profunda (DP) e ganhos por ascensão capilar (AC), devem ocorrer à profundidade L , que deve estar abaixo da zona radicular. A contabilidade de todos estes “componentes” do balanço reflete a quantidade de água que fica contida na camada do solo, medida através do armazenamento de água ΔA_L (Equação 3).

$$P + I - RO - ET - DP + AC = \Delta A_L \quad (3)$$

onde, ΔA_L é a variação do armazenamento indicando, simplesmente, que a adição dos componentes é a variação do armazenamento de água na camada 0-L.

A evapotranspiração da cultura, juntamente com as características físico-hídricas do solo (textura, capacidade de campo, ponto de murcha, densidade do solo, etc.) e as características do sistema de irrigação, são fatores fundamentais na determinação da lâmina de irrigação pelo balanço hídrico.

Os principais fatores climáticos que afetam a evapotranspiração são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. A evaporação para atmosfera baseada nesses parâmetros, para uma cultura de referência, é denominada evapotranspiração de referência (ET_o) (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de cultura (ET_c), pode ser calculada a partir de dados climáticos e integrar diretamente os fatores referentes à resistência da cultura, ao albedo e à resistência do ar no método Penman-Monteith, usado para estimar a evapotranspiração da cultura de referência, ou seja, a ET_o. As relações determinadas experimentalmente de ET_c/ET_o são chamadas Coeficientes de Cultura (k_c) e são usadas para relacionar ET_c com ET_o, ou seja: $k_c = ET_c / ET_o$. Diferenças na anatomia foliar, características dos estômatos, propriedades aerodinâmicas e mesmo o albedo determinam as diferenças da ET_c em relação à ET_o sob as mesmas condições climáticas (ALBUQUERQUE et al., 2002).

O valor do coeficiente de cultivo (k_c) varia com a fase de desenvolvimento da cultura. Para maioria dos cultivos o valor de k_c para o período total de crescimento está entre 0,85 e 0,9 sendo ligeiramente superior para banana, arroz, café e cacau, e um pouco inferior para os citros, videira, sisal e abacaxi (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

O coeficiente de cultura (k_c) é um indicador de grande significado físico e biológico, uma vez que depende da área foliar, arquitetura da planta (parte aérea e sistema radicular), cobertura vegetal e transpiração da planta (FAVARIN et al., 2002).

Devido às variações nas características ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, os k_c das culturas variam desde a semeadura até a colheita. Doorenbos; Pruitt (1992) propuseram uma metodologia para estimativa do k_c ao longo do ciclo da cultura, dividindo-o em quatro estádios:

- a) inicial – da semeadura à emergência completa das folhas definitivas, perfazendo mais ou menos 10% da superfície do solo;
- b) crescimento – do final do estágio inicial até a cobertura de 80% da área e/ou início da floração;
- c) intermediário – do final do estágio de crescimento até o início da maturação;
- d) final – do final do estágio intermediário até a colheita.

Segundo esta metodologia, somente três valores de kc são necessários para descrever e construir uma curva de variação do kc da cultura: os dos estádios inicial (kcini) e intermediário (kcmed), que têm valores constantes ao longo dos respectivos estádios, e um terceiro valor para o período de colheita (kcfim). O kc no estádio de crescimento tem um valor crescente linear entre o kcini e kcmed e, no estádio final, linearmente decrescente entre o kcmed e kcfim (ALBUQUERQUE et al., 2002).

2.6 Distribuição espacial do sistema radicular

O conhecimento da distribuição do sistema radicular de uma cultura é essencial no dimensionamento e manejo racional da irrigação, orientando na localização dos sensores de umidade e emissores. A identificação de zonas com maior concentração de raízes permite ainda a aplicação localizada de fertilizantes e corretivos, elevando sua eficiência e proporcionando, conseqüentemente, redução nos custos e nos impactos ambientais (MONTENEGRO et al., 2004).

A distribuição do sistema radicular depende de muitos fatores relativos ao solo onde a cultura está inserida, como a resistência mecânica, a umidade, a aeração e a fertilidade. Para fins de irrigação, a profundidade efetiva das raízes é um dos parâmetros básicos para projetos e manejo da água na cultura. A profundidade efetiva representa a camada desde a superfície do solo até onde se concentra a maior parte das raízes absorventes. Bassoi et al. (2000) recomendam essa profundidade para o monitoramento da água do solo visando ao manejo de irrigação.

Em estudo para determinação do consumo de água e distribuição radicular de Goiabeira, em Petrolina, Ferreira (2004) considerou que o sistema radicular das culturas é importante para definição das profundidades para instalação de sensores de umidade do solo e contribui para o adequado monitoramento de água de irrigação e nutrientes na cultura, práticas que vão melhorar as técnicas de manejo, abrir novas perspectivas de estudos mais complexos e precisos das interações raiz-solo e da influência de diferentes práticas culturais em condições de campo.

2.7 A cultura

A melancia é bastante explorada em muitos países do mundo, como a Índia, Irã, Itália e os Estados Unidos. No Brasil, destacam-se como regiões produtoras o Sudeste, o Centro-Oeste e o Nordeste, na microrregião do Médio São Francisco, principalmente nos municípios de Petrolina e Juazeiro (SOARES et al., 2002).

A melancia tem sua produção comprometida quando o déficit hídrico ocorre no período da frutificação até o início da maturação; no período da maturação até a colheita, a exigência hídrica é bem menor, enquanto o excesso de água ocasiona rachadura nos frutos e presença de frutos insípidos e podridões (CASALI et al., 1982).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, localizado na região norte do estado do Ceará, entre os Municípios de Marco, Bela Cruz e Acaraú (Latitude: 3°07'13'' S, Longitude: 40°05'13'' W), com clima Aw' (tropical chuvoso) segundo a classificação de Köppen, possui um potencial imediato para a irrigação de mais de 8.000 ha com culturas de elevado valor econômico, além de mais 4.000 ha da ampliação aprovada pelo PAC (Programa de Aceleração do Crescimento) do Governo Federal.

O solo da região caracteriza-se por apresentar elevada capacidade de infiltração e baixa capacidade de retenção de água, o que o pré-dispõe a uma elevada perda de água por percolação, reduzindo assim o potencial da eficiência de irrigação. A consequência ambiental disso é a percolação para o lençol freático de nutrientes, além da própria ascensão do lençol, conforme verificado por Chaves et al. (2006).

A escolha do Perímetro como área de estudo, deu-se pelo fato de apesar da elevada demanda de água para irrigação, o Perímetro não possui nenhuma estratégia de manejo da mesma. Tal fato leva os irrigantes a manejar a irrigação pelo total empirismo de outras experiências, sem levar em consideração as peculiaridades locais.

3.2 Ensaios preliminares, a campo, para o uso do sensor TOPDEA no manejo da irrigação.

3.2.1 O sensor TOPDEA

Os sensores de umidade do solo utilizados foram os do tipo capacitivo, produzidos no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), do Departamento de Engenharia

Agrícola (DENA), pertencente à Universidade Federal do Ceará (UFC). São confeccionados na forma retangular em placas de circuito impresso (fibra de vidro, com uma fina camada de cobre em um dos lados), com espessura, largura e tamanho aproximados de 0,2 cm, 3 cm e 15 cm, respectivamente (Figura 1). As placas são posicionadas paralelamente definindo os eletrodos do capacitor, separadas em 0,5 cm e cobertas por um verniz, que segundo Rende e Biage (2002), serve tanto para evitar oxidação das placas de cobre, devido o contato com o solo, como para eliminar o efeito da condutância elétrica da carga através do dielétrico. A área da placa que constitui o campo elétrico é de 25,48 cm². O sensor é composto de um oscilador, cuja frequência é definida pelo capacitor que pode variar o dielétrico e por um resistor fixo de 10 kΩ. O Sensor pronto para instalação pode ser observado na Figura 2.



Figura 1 – Visão periférica do sensor TOPDEA



Figura 2 – Sensor pronto para instalação

3.2.2 Calibração dos sensores

Os sensores foram calibrados através de uma análise de regressão entre as leituras de frequências emitidas pelos mesmos, e as respectivas umidades das amostras.

- Coleta e preparação das amostras

As amostras foram coletadas em duas camadas 0 – 20 cm e de 20 – 40 cm, tal processo foi possibilitado por meio da escavação de pequenas trincheiras (Figura 3) com uma profundidade de aproximadamente 60 cm.



Figura 3 – Trincheira para coleta de amostra indeformada do solo

Para garantir a manutenção das características físico-estruturais, durante a coleta, fez-se uso de contêntores, com volume interno de $13,0 \text{ dm}^3$, que tiveram uma de suas laterais serradas (Figuras 4a e 4b) e após as coletas recolocadas com o auxílio de arame. No intuito de evitar-se a perda de solo nos processos subseqüentes, os contêntores foram previamente revestidos internamente por uma manta de tecido.



Figura 4a – Retirada de amostra



Figura 4b – Acondicionamento das amostras.

As amostras foram posteriormente levadas ao Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, onde foram saturadas por capilaridade, evitando-se a compactação. O processo de saturação por capilaridade deu-se através da utilização de uma caixa de água, com capacidade de 1.000 litros, onde as amostras foram depositadas, possibilitado por furos realizados no fundo dos contentores e pelas fendas laterais presentes devido ao processo de retirada das mesmas, por mais de 24 horas.

O passo seguinte foi colocar as amostras, uma a uma, em uma balança tipo gangorra. A balança era composta de um lado por uma estrutura de metal para apoio da amostra, e do outro por uma célula de carga da ALFA Instrumentos, com capacidade máxima de 20 kg (Figura 5). Como o peso da amostra saturada superava a capacidade máxima da célula de carga fez-se necessário o uso de contrapesos, que somaram 17 kg.

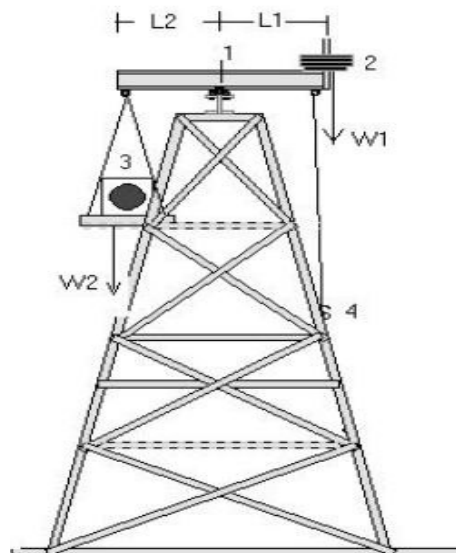


Figura 5 – Esquema da estrutura de aço 1020 com os componentes da balança e a distribuição das cargas atuantes; eixo, mancais e rolamentos (1); contrapeso (2); coluna de solo com sensores a serem calibrados (3); célula de carga (4). (Fonte: Leão, 2002).

- Calibração da balança

A calibração da balança foi realizada adicionando-se paulatinamente peças de metal, com peso obtido em balança com precisão de 0,01 g, e as leituras da célula de carga que eram

capturadas através de uma placa de aquisição de dados modelo TD40, da empresa TERN. O programa hiperterminal do Windows transformava as leituras em arquivo do tipo txt (Figura 6). Os dados foram processados através de uma análise de regressão no Software Excel, obtendo-se assim a equação de melhor ajuste entre leitura da célula de carga e o peso real ao qual a balança era exposta.



Figura 6 – Equipamentos utilizados para capturar os dados da célula de carga.

- Obtenção da umidade do solo

Os valores de umidade do solo foram obtidos através da relação volume de água sobre o volume de solo da amostra. Para a determinação do volume de água na amostra determinou-se primeiramente a massa de água na mesma através da Equação 4.

$$m_a = (m_{ss} + Tara) - m_s \quad (4)$$

onde: m_a é a massa de água contida na amostra (g), m_{ss} é a massa do solo saturado (g), observado através da célula de carga e m_s é a massa dos sólidos do solo (g), seco em estufa à 110° C por 24 horas.

Encontrado o valor da massa da água, calculou-se o volume da mesma fazendo-se uso da Equação 5 para o cálculo da densidade da água.

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a}, \quad (5)$$

onde: ρ_a é a densidade da água (kg dm^{-3}) e V_a é o volume da água (dm^3).

Deduzindo-se a Equação 5, tem-se então a Equação 6 para o volume da água.

$$V_a = \frac{m_a}{\rho_a}, \quad (6)$$

O volume da amostra foi determinado utilizando-se das Equações 5 e 6 aplicadas ao solo, obtendo-se desta forma, as Equações 7 e 8.

$$d_g = \frac{m_s}{V}, \quad (7)$$

onde: d_g é a densidade global do solo (g cm^{-3}), m_s é a massa dos sólidos do solo (g), contida no cilindro de Uhland utilizado para coleta e V é o volume do solo (cm^3), contido no cilindro.

Deduzindo-se a Equação 9, tem-se a Equação 10 que possibilita a determinação do volume total da amostra.

$$V = \frac{m_s}{d_g}, \quad (8)$$

onde: V é o volume do solo da amostra (dm^3) e m_s é a massa dos sólidos do solo (kg), seco em estufa.

- Coleta de dados dos sensores

Os sensores foram colocados em pares, em cada amostra, distanciados por aproximadamente 25 cm (Figura 7). Os sensores foram conectados a um frequencímetro de bancada da marca BK Presicion com clock máximo de 2 GHz no qual se leu a frequência produzida por cada um dos sensores. As frequências foram anotadas em planilhas juntamente com a respectiva leitura da célula de carga. Na primeira hora, as leituras foram tomadas a cada 10 min e depois a cada meia hora até que a diferença entre a primeira e a última leitura da célula de carga atingisse aproximadamente 4 kg.

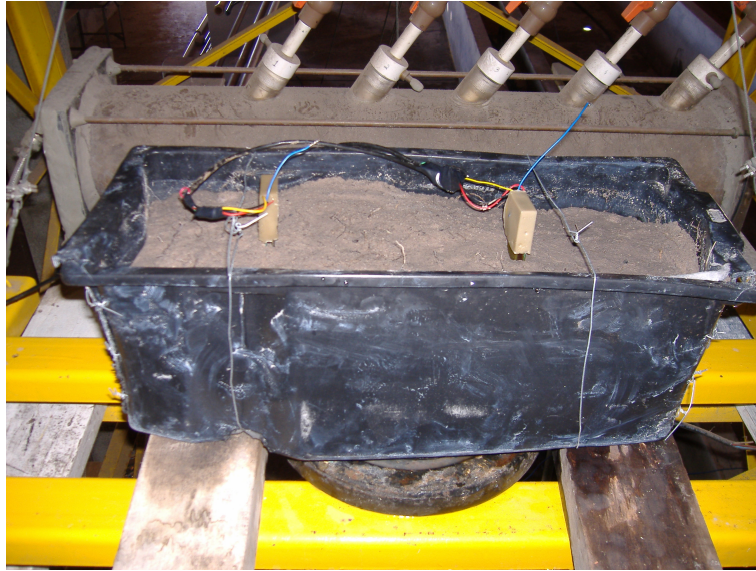


Figura 7 – Distribuição dos sensores nas amostras para calibração

3.2.3 Validação da equação de calibração, a campo, do sensor TOPDEA em relação ao balanço hídrico do solo.

3.2.3.1 Avaliação do sistema de irrigação da área experimental com bananeira

O sistema de irrigação adotado no pomar de bananeira era formado por microaspersores, com espaçamento de 4,0 x 6,0 m. A avaliação seguiu a metodologia proposta por Merriam & Keller (1978), sendo tomado para análise quatro linhas (1^a, 1/3, 2/3 e final) e quatro emissores (1^o, 1/3, 2/3 e final). No intuito de minimizar erros foram feitas três repetições para cada emissor.

3.2.3.2 Balanço hídrico com sensores de umidade de solo TOPDEA (BHS).

O balanço hídrico tomando por base o sensor de umidade do solo, em geral visa repor o armazenamento de água no solo, indicando assim quando e quanto irrigar. As características

físico-hídricas dos solos do Baixo Acaraú obtidas em análises prévias indicam uma baixa capacidade de armazenamento de água. Assim, os sensores funcionam como uma ferramenta de precisão indicando o perfeito fracionamento da irrigação, para um manejo com elevada frequência de irrigação.

O momento da irrigação será indicado pela umidade volumétrica atual do solo e a quantidade de água a ser aplicada pela diferença entre a umidade determinada como capacidade de campo e a atual, como mostra a Equação 9.

A equação do balanço hídrico se converte em:

$$\Delta A_L = (\theta_{cc} - \theta_a) * L , \quad (9)$$

onde ΔA_L representa a variação do armazenamento de água no solo (mm), θ_{cc} indica o valor de umidade na capacidade de campo, θ_a a umidade atual e L a profundidade efetiva da raízes em mm.

3.2.3.3 Balanço hídrico do solo, com base nos dados climatológicos (BHC).

- Cálculo da Evapotranspiração da cultura

Para o cálculo da ETo utilizou-se dos dados obtidos pela estação meteorológica automatizada (Figura 8) instalada no Distrito de Irrigação. A mesma forneceu dados climatológicos médios horários necessários para aplicação na fórmula combinada de Penman-Montheih (ALLEN, et al., 1998) que tem como base a original fórmula de Penman.



Figura 8 – Estação meteorológica automática, instalada no Distrito de irrigação

De posse de valores da ET_o e do coeficiente de cultura disponibilizado na literatura por Bezerra & Oliveira (1999) e Silva (2004) foi possível estimar a evapotranspiração da cultura através da Equação 10.

$$ET_c = k_c \times ET_o \quad (10)$$

3.2.3.4 Conversão dos dados

Para a realização da validação, fez-se necessário a transformação dos dados obtidos tanto pelo balanço hídrico climatológico como pelo balanço hídrico obtido através do sensor para o mesmo parâmetro. O parâmetro escolhido, visando facilitar o manejo, foi o do tempo de funcionamento do sistema de irrigação. Para tanto se elaborou uma planilha, no software Excel, para conversão utilizando parâmetros como vazão do sistema e área a ser irrigada (Apêndices A e B).

3.2.3.5 Área experimental

A área experimental para validação foi cedida pela MaxFruit, sendo uma área cultivada com a cultura da banana, variedade prata-anã, totalizando 0,8 ha. A área era constituída de vinte e oito fileiras duplas, com espaçamento de 2x2x4 m e comprimento de 92 m.

Os sensores foram distribuídos de forma aleatória aos pares, sendo o primeiro monitorando a faixa de 0 a 20 cm e o segundo a faixa de 50 a 60 cm do solo a uma distância média de 25 cm do pseudocaule. No intuito de minimizar o efeito bordadura as duas primeiras linhas de plantio foram retiradas do sorteio (Figura 9).

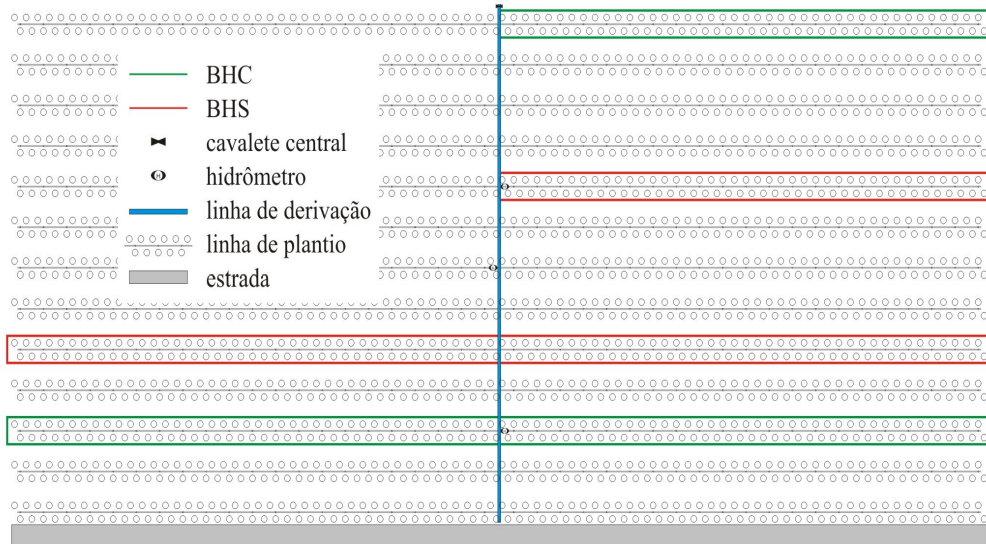


Figura 9 – Croqui da área experimental

3.2.3.6 Acompanhamento da umidade

Para a realização do acompanhamento da umidade do solo foram instalados sensores a três profundidades (5, 20 e 50 cm), em uma linha onde se realizou o manejo com base no sensor.

Os dados eram coletados por uma placa multiplexada (Figura 10), com três relés, sendo destinado um tempo de três segundos de coleta para cada sensor e dois segundos com coletas nulas entre sensores.



Figura 10 – Placa multiplexada para coleta de dados emitidos por diferentes sensores.

A placa enviava os dados em contador digital para hiper-terminal, que os convertia em arquivos de extensão txt, como realizado para a calibração dos sensores. Os arquivos foram trabalhados no software OriginPro – 7.5, por sua capacidade de trabalhar com um elevado número de dados. No Origin os dados aqusitados na forma digital (número digital) foram convertidos em umidade e tempo, através da inserção das fórmulas necessárias no mesmo.

3.2.3.7 Pré-teste

Na intenção de se ter uma maior segurança, já que os sensores ainda não haviam sido testados a campo, após a calibração dos sensores os mesmos foram levados a campo e instalados em uma área com melancia para averiguação. Os sensores passaram aproximadamente 12 dias coletando dados de frequência, que posteriormente foram transformados em umidade, no momento anterior ao início da irrigação. Após o período no campo, os sensores foram novamente

levados ao Laboratório para observação de suas leituras máximas, feitas ao ar, e leituras mínimas onde os sensores foram inteiramente submersos em água como mostra a Figura 11.

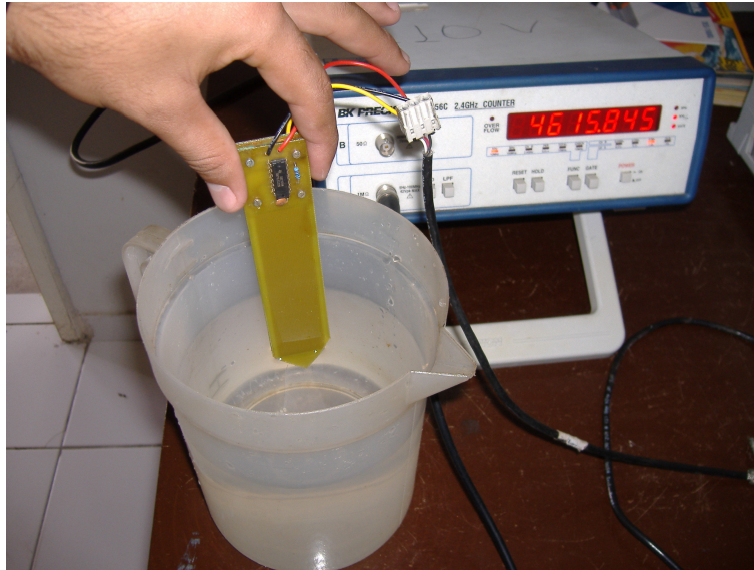


Figura 11 – Verificação das leituras, realizadas em Laboratório, para condições extremas.

3.3 Avaliação do manejo da irrigação utilizando-se o sensor TOPDEA.

O desempenho do sistema de manejo foi avaliado pelos seguintes parâmetros: volume de água alocado, produtividade por área, produtividade da água, determinação do número necessário de sensores para representatividade da umidade e efeito da geometria de instalação dos sensores.

Neste trabalho decidiu-se por adotar dois horários para a determinação da umidade atual no solo e acionamento do sistema de irrigação. A primeira leitura ocorreu sempre entre as 07:30 e 08:00 h e a segunda entre 14:00 e 14:30 h. As irrigações eram iniciadas logo após a realização das leituras e o tempo de funcionamento de acordo com o processamento dos dados.

As leituras dos sensores eram realizadas com o auxílio de freqüencímetro portátil, sendo as mesmas processadas em planilha do Excel (Apêndice A).

3.3.1 Área experimental

A área experimental foi composta por 1,0 ha, do Lote C07/1, cultivada com melancia da variedade Thompson Sweet, em espaçamento de 0,9 m entre plantas e 3,0 m entre linhas (Figura 12), totalizando 3.704 plantas.



Figura 12 – Área experimental cultivada com melancia.

Foram semeadas duas sementes por cova, equidistantes do emissor, para que com um posterior desbaste pudesse ser garantida pelo menos uma planta por cova.

3.3.2 O sistema de irrigação

O sistema de irrigação foi formado por um conjunto motor-bomba de 3 cv, uma tubulação principal de 106,0 m com tubos de PVC de 75 mm, uma linha de derivação de 96,0 m com tubos de PVC de 50 mm e 64 linhas laterais de 55,0 m formadas por tubos de polietileno de

18 mm dotados de gotejadores, a cada 30 cm, com vazão de $1,49 \text{ L.h}^{-1}$ a uma pressão de serviço de 80 kPa.

O sistema era acionado duas vezes ao dia e o tempo de funcionamento determinado pelo resultado do processamento dos dados de leitura, dos sensores, para que o solo atingisse um valor de $\Theta = 17 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. O sistema de irrigação permitia, pelo seu dimensionamento, a irrigação de 0,5 ha por vez, sendo o controle realizado por um cavalete dotado de registros de fecho rápido.

3.3.3 Distribuição e instalação dos sensores no campo

Dezesseis sensores foram distribuídos em pares, em linhas escolhidas de forma aleatória, dentre as 32 linhas de plantio de metade da área (Figura 13) e mais dois pares na outra metade. Como os sensores possuem aproximadamente 10 cm de comprimento o primeiro representou a faixa de solo de 5 a 15 cm, enquanto que o segundo a faixa de 15 a 25 cm.

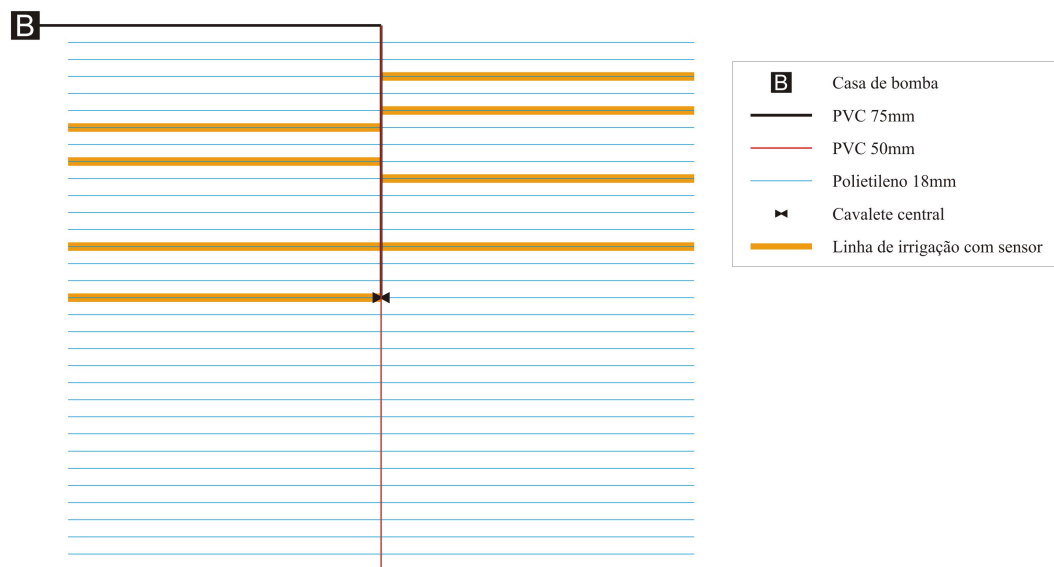


Figura 13 – Croqui da área experimental com melancia e linhas sorteadas com sensores.

Todos os sensores foram instalados no emissor que representava o primeiro terço da linha lateral, partindo-se da linha de derivação, por representar o ponto médio de pressão em uma linha de irrigação. A instalação dos sensores deu-se no oitavo dia após o plantio.

Para avaliação da distribuição dos sensores, a fim de determinar o número ideal a ser distribuído no campo, realizou-se no SAEG uma análise estatística entre o número de emissores por hectares, como tratamento, e a leitura média em tempo de funcionamento do sistema para suprir a lâmina de reposição dos mesmos.

3.3.4 Avaliação do efeito geométrico de instalação

Para a avaliação do efeito geométrico de instalação, na resposta dos sensores, procedeu-se uma análise comparativa entre as distâncias de instalação dos sensores (Figura 14) com relação ao emissor e a região das raízes em que os mesmos se encontravam e suas respectivas leituras fazendo-se, assim, necessária uma análise da distribuição espacial das raízes em duas dimensões.



Figura 14 – Mensuração da distância existente entre emissores e sensores.

3.3.5 Avaliação da distribuição espacial das raízes

A avaliação da distribuição radicular (Figura 15) seguiu a metodologia proposta por Costa et al. (2007), durante avaliação da distribuição das raízes de abacaxizeiro no Perímetro Irrigado Tabuleiro de Russas, Ceará.

Utilizou-se um quadro de madeira com dimensões de 50 x 50 cm e subdivisões de 10 x 10 cm.



Figura 15 – Distribuição do sistema radicular da melancia.

Foram abertas trincheiras com dimensões de 60 x 60 cm, de modo a acomodar o quadro de madeira e todo o sistema radicular da cultura. As fotografias foram realizadas com máquina digital, o passo seguinte foi processá-las no software Fotoshop e SIARCS[®] a fim de obter a distribuição espacial das raízes.

3.3.6 A cultura

A cultura foi conduzida segundo recomendações técnicas no que diz respeito à adução e aplicações de defensivos, além da condução das ramas e ponto de colheita. Portanto o único

fator de produção diferenciado dos praticados na região foi o manejo da irrigação, permitindo desta forma avaliar com segurança o funcionamento do sensor para o monitoramento do mesmo.

As recomendações técnicas adotadas foram de fontes de pesquisa na literatura e dados fornecidos por técnico, especialista na cultura, que presta serviço de assistência aos produtores de curcubitáceas do Perímetro Irrigado. O mesmo forneceu os dados de necessidade hídrica da melancia e produtividade média para a região.

3.3.7 Avaliação do número de sensores por hectare, necessário ao manejo de irrigação

Para a avaliação de quantos pares de sensores seriam necessários para representar uma área a ser irrigada, no presente trabalho 1,0 ha, procedeu-se uma análise tendo como tratamento o número de sensores por hectare e como resposta o tempo de irrigação indicado pelos respectivos tratamentos para treze repetições.

Como cada par de sensores representava uma linha de plantio, os tratamentos passaram a ser o número de linhas utilizadas para compor a média do tratamento. Desta forma as linhas selecionadas foram as que propiciaram uma distribuição mais equidistante, entre as linhas, dentro da área a ser irrigada.

3.3.8 Avaliação da estratégia de manejo

A estratégia de manejo adotada, ou seja, o uso do sensor TOPDEA para o manejo da irrigação, tomou por base a comparação entre os dados obtidos neste trabalho com os encontrados na literatura citada e os dados fornecidos por técnico especialista da cultura da melancia que presta serviço no Perímetro Irrigado do Baixo Acaraú.

Os fatores avaliados foram citados no caput do item 3.3.

3.3.9 Marcha de crescimento e absorção da cultura

Para mensurar o crescimento da cultura e relacioná-la com o regime de absorção de água, escolheu-se no trigésimo dia após o plantio, de modo aleatório, sete plantas as quais tiveram o tamanho de seus ramos principais medidos com auxílio de régua (Figura 16). As plantas foram medidas em três horários distintos, de modo a permitir observar o comportamento do crescimento em relação às modificações do ambiente.



Figura 16 – Horário de observação e respectivas variações no crescimento do ramo principal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração dos sensores

4.1.1 Calibração da balança

A análise de regressão para calibração da célula de carga apresentou um coeficiente de determinação ajustado (R^2) igual a 0,9999, como pode ser observado na Tabela 2 abaixo, justificando a linearidade apresentada pela Figura 17.

Tabela 2 - Análise de variância para calibração da célula de carga

Estatística de regressão	
R múltiplo	0.999994538
R-Quadrado	0.999989075
R-quadrado ajustado	0.99998862
Erro padrão	3.339805251
Observações	26

ANOVA					
	GI	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão	1	24504544.69	24504545	2196870	4.65736E-61
Resíduo	24	267.7031788	11.1543		
Total	25	24504812.39			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P
Interseção	600.3323	1.275128038	470.8016	4.18E-49
Coef. angular	0.1741	0.000117441	1482.184	4.66E-61

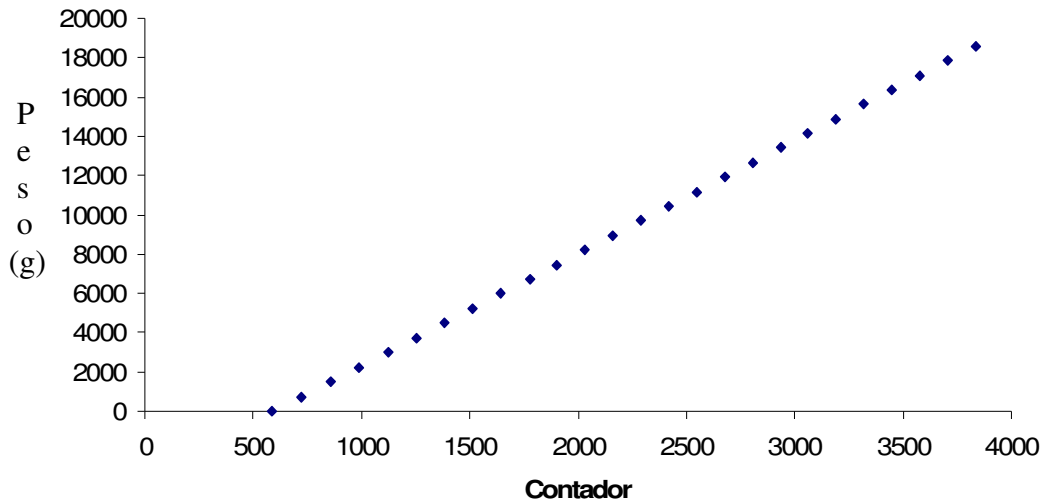


Figura 17 – Peso obtido em função do número do contador digital.

A equação de calibração para a relação peso versus contador, apresentada na Equação 11, demonstra que a célula apresenta um “off set” de 600,3323 g ou seja os pesos só seriam computados a partir de tal valor, mas como a amostra, mesmo no momento de menor umidade, apresentava valores bem superiores ao valor supracitado tal fato não se constituiu em problemas para o experimento.

$$P = 0,1741 * c + 600,3323 \quad (11)$$

Onde, P é a massa a qual a célula de carga está sendo submetida e c o número do digital fornecido pelo sistema de aquisição de dados (Apêndice C).

4.1.2 Obtenção da umidade

A amostra saturada apresentou, segundo a Equação 6, uma massa de água equivalente a 5.016,80 g. Tomando por base o peso seco da amostra, realizado em estufa, que foi de 20.910 g pode-se dizer então que a umidade de saturação da amostra, com base em massa (u), é de 23,99%. De posse da massa da água contida na amostra e fazendo-se uso da Equação 8 observa-se que a água ocupava no momento da saturação um volume de 5,0168 dm³ ou 5,0168 L.

O cilindro de Uhland utilizado na determinação da densidade global do solo possuía um volume de 272,409 cm³, já que era composto por um diâmetro interno de 6,96 cm e uma altura de 7,16 cm. A massa média obtida das três repetições foi de 441,38 g (Tabela 3), portanto resultando em uma densidade do solo de 1,62 kg dm⁻³ ou 1.620 t m⁻³, segundo a Equação 9.

Tabela 3 - Peso médio das amostragens para determinação da densidade global da amostra

Nº do recipiente	Peso do recipiente (g)	Solo+recipiente (g)	Solo (g)
61	106,780*	555,170	448,390
A3	105,560*	542,720	437,160
A18	60,800	499,390	438,590
Peso médio do solo (g)=			441,380

* Pesos de recipientes com tampa

A amostra apresentou um volume, segundo a Equação 10 de 12,907 dm³ ou 12,907 L. Com os dados do volume de água contida na amostra e o volume total da mesma encontrou-se pela relação entre as duas uma umidade com base em volume (θ), para a amostra saturada de 0,388 m³ m⁻³. Na medida em que o tempo passava a amostra perdia água tanto pelo processo de percolação como por evaporação o que tornava necessário recalcular a umidade e tomar nota da nova frequência emitida pelo sensor. O processo se repetiu até que a amostra atingisse um $\theta = 0,025$ m³ m⁻³.

A análise de regressão, para umidade em função da frequência apresentou um R² ajustado de 0,9865 e um erro padrão de 0,068, além de um elevado grau de significância (Tabela 4) para a seguinte equação potencial, Equação 14.

$$\theta = 1778371018 * f^{-2,3894213} \quad (14)$$

Onde: θ é a umidade volumétrica (m³ m⁻³) e f é a frequência emitida pelo sensor em kHz.

Tabela 4 - Análise de variância para calibração do sensor, para determinação da umidade com base na frequência emitida pelo mesmo

<i>Estatística de regressão</i>					
R-Quadrado		0,98656789			
R-quadrado ajustado		0,98651832			
Erro padrão		0,06831153			

ANOVA	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	92,88379	92,88379	19904,53	1,126E-255
Resíduo	271	1,264612	0,004666		
Total	272	94,1484			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Constante	1778371018	0,130294	163,4684	8,3E-273
Expoente	-2.3894213	0,016936	-141,083	1,1E-255

O uso de equação potencial discorda com alguns autores como Topp et al. (1980) e Silva et al. (2005), que ao trabalharem com este tipo de instrumento concluíram que a equação de melhor ajuste é a do tipo polinomial do 3º grau. Porém dependendo do intervalo de dados utilizados para a realização da calibração este tipo de equação pode apresentar dados sem consistência no momento da utilização a campo, como por exemplo superestimar a umidade para valores de frequência elevados.

4.2 Ensaio preliminares, a campo, para o uso do sensor TOPDEA no manejo da irrigação

4.2.1 Avaliação do sistema de irrigação por microaspersão

A avaliação do sistema de irrigação (Figuras 18 e 19) da área permitiu encontrar uma vazão média de $38,0 \text{ L h}^{-1}$, para os microaspersores que compunham o sistema, o que resultou em uma vazão total de $24,472 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. O coeficiente de uniformidade (CUC) foi de 90,76%.



Figura 18 – Coleta de água dos emissores para avaliação do sistema



Figura 19 – Contabilização do volume para determinação da vazão do sistema.

4.2.2 Análise comparativa entre BHS e BHC

A Tabela 5 apresenta os resultados da comparação, após a conversão dos dados, em tempo de funcionamento do sistema de irrigação para suprir a lâmina líquida de reposição, sendo o BHS calculado com base na média das repetições, em vinte e oito observações entre 193 e 272 dias após o plantio (DAP).

Tabela 5 - Tempos de funcionamento do sistema de irrigação, necessários a reposição da ETC, de acordo com a estratégia de manejo adotada

DAP	BHS (min)	BHC (min)	DAP	BHS (min)	BHC (min)
193	431	133.3	229	173	132.4
194	294	153.6	230	146	131.2
195	270	153.4	231	201	121.9
196	257	141.7	239	138	131.6
197	236	158.0	240	146	124.4
220	319	129.3	241	120	132.8
221	318	148.8	242	120	138.8
222	257	138.4	243	141	134.7
223	192	146.9	245	131	134.0
224	146	128.3	259	115	140.3
225	158	124.1	260	120	147.0
226	160	125.2	261	180	144.9
227	158	139.2	271	160	135.1
228	171	129.6	272	155	134.5

Através da plotagem dos resultados da Tabela 05, em gráfico (Figura 20) foi possível visualizar a dispersão do tempo de funcionamento do sistema de irrigação, tendo como base tanto o balanço hídrico estimado pelo sensor como o balanço hídrico climatológico simulado.

O balanço hídrico com base no sensor apresentou grandes variações durante o período de observação. O valor extremo para tempo de irrigação foi de 431 min enquanto o balanço hídrico do solo com base nos dados de clima mostrou-se relativamente estável com variação máxima de aproximadamente 40 min.

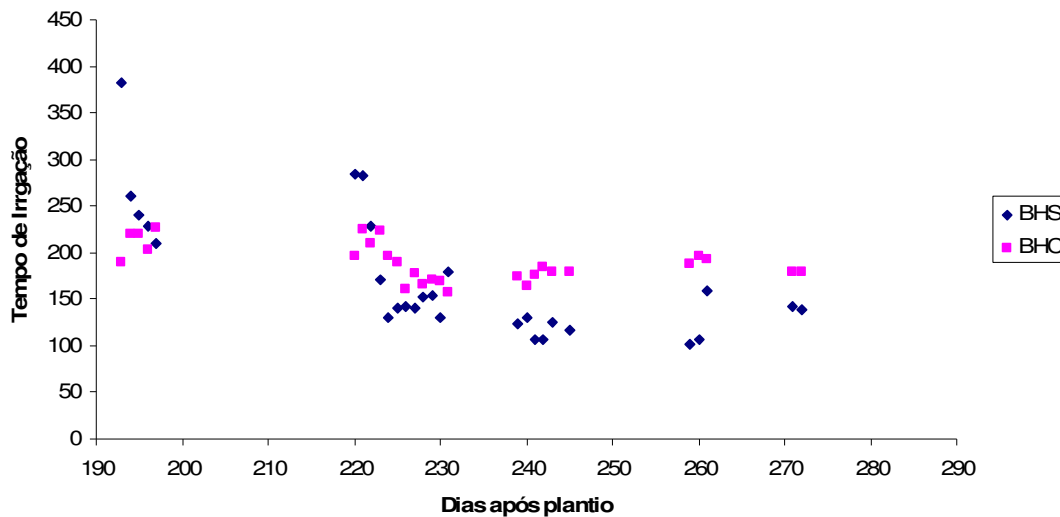


Figura 20 – Tempo de funcionamento do sistema de irrigação (min) em função do manejo.

A grande variação observada no balanço hídrico com sensores deve-se ao fato de o mesmo representar a situação real do cotidiano, enquanto o balanço hídrico climatológico tem sua base de dados em aspectos climáticos e coeficientes de cultura calculados teoricamente com a situação ótima para o desenvolvimento da cultura estudada. Como exemplo, os valores extremos indicados pelo sensor ocorreram em ocasiões em que ou o sistema de irrigação havia apresentado defeito em dias anteriores, portanto não existindo irrigações em tais dias, ou por falha humana onde o tempo de funcionamento não foi o indicado. No entanto, quando as condições de funcionamento do sistema eram perfeitas a diferença entre os dois métodos eram pequenas.

4.2.3 Acompanhamento da umidade

A Figura 21 representa a plotagem dos dados de umidade, no software OriginPro - 7.5, obtidos dos sensores instalados a três profundidades: 5, 20 e 50 cm. O sensor na terceira profundidade indica pequena variação na umidade o que corrobora para a confirmação de que os tempos de irrigação indicados pelo sensor eram o suficiente apenas para fornecer água à profundidade efetiva das raízes.

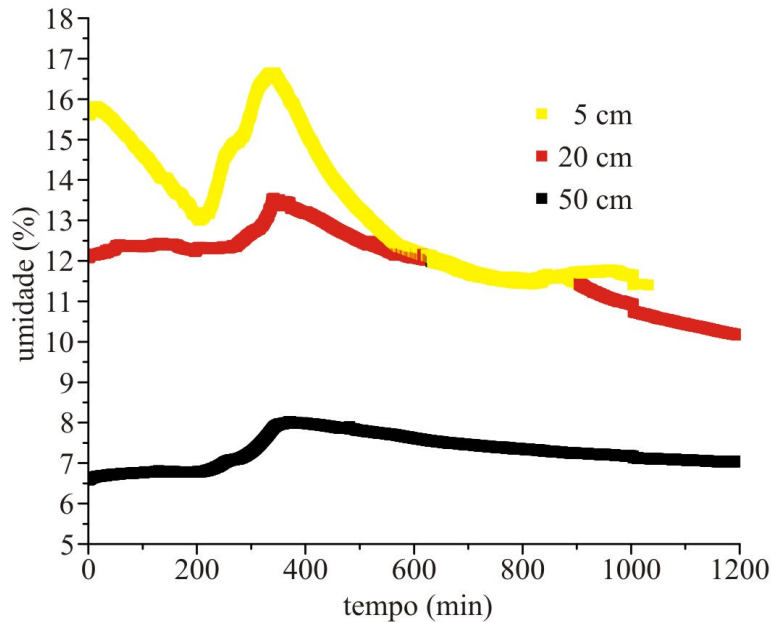


Figura 21 – Variação da umidade segundo a camada observada e o tempo.

4.3 Avaliação do manejo da irrigação utilizando-se o sensor TOPDEA

4.3.1 Avaliação do sistema de irrigação

O sistema de irrigação possibilitou uma faixa contínua de umidade com 0,40 m de largura, para cada linha de plantio e como a área foi composta por 32,0 linhas com 100,00 m de comprimento, tal fato proporcionou uma área molhada de 1.508,00 m², ou seja, Ks igual a 0,15, diminuindo consideravelmente a área de influência para evaporação.

4.3.2 Distribuição e instalação dos sensores no campo

De acordo com a randomização, realizada no Excel, as linhas de plantio contempladas com sensores foram as de números: 6, 8, 13, 16, 20, 24, 28 e 30.

As distâncias de instalação dos sensores em relação aos emissores, após o desbaste podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Distancias comparativas entre emissores e sensores (e-s), emissores e plantas (e-p), e sensores e plantas (s-p)

Linha	Tratamento	Distância (e-p) (cm)*	Distância (e-s) (cm)**	Distância (e-s2) (cm)***	Distância (s-p) (cm)****
6	1	9,90	15,00	9,00	23,09
8	2	11,40	22,85	23,43	11,66
13	3	10,30	19,70	18,79	9,49
16	4	12,08	19,85	21,63	10,20
20	5	13,93	25,30	21,95	17,03
24	6	18,87	28,30	22,85	9,43
28	7	13,00	18,38	18,36	5,39
30	8	14,42	17,72	26,93	13,93

* Distância entre o emissor e a planta;

** Distância entre o emissor e o sensor da primeira profundidade;

*** Distância entre o emissor e o sensor da segunda profundidade; e

**** Distância entre a planta e o sensor da primeira profundidade;

As diferenças nas distâncias foram provocadas pela execução do desbaste e afastamento das linhas de gotejadores das plantas efetuada aos 14 DAP, visando à redução do potencial efeito de ação da fusariose no colo da planta. Estes procedimentos foram realizados após a instalação dos sensores.

4.3.3 Avaliação do efeito geométrico de instalação

A análise de variância, realizada no SAEG/UFV, para o efeito da distância de instalação dos sensores nas leituras mostrou-se significativa (Apêndice D). A Tabela 7 mostra o resultado para teste de média ao nível de 5% de significância para as leituras de frequência dos sensores em kHz, em função da distância de instalação do sensor ao emissor.

Tabela 7 - Teste de comparação de médias para distâncias dos sensores aos emissores

Tratamento	Dados	Médias (kHz)	Comparações
5	25	4574.1201	A
2	25	4362.0400	B
6	25	4114.6401	C
7	25	3858.0400	D
8	25	3765.1201	D
3	25	3732.4399	D
1	25	3169.3999	E
4	25	2891.3601	F

$Q(0,050; 180) = 4.290$ Dms = 132.8106

Os resultados da Tabela 7 mostram que a maior média de frequência ocorreu quando no Tratamento 5, quando o sensor estava instalado a uma distância de 25,3 cm do emissor (ver Tabela 6). Já a menor média ocorreu no Tratamento 4, a uma distância de 19,85 cm (ver Tabela 6), o que mostra o efeito da distância de instalação na leitura de frequência. Todavia, o resultado de comparação das médias não seguiu um padrão de correlação direta, tal comportamento deveu-se, provavelmente, ao fato de as variações nas distâncias não terem ocorrido no sentido transversal a faixa molhada.

4.3.4 Avaliação da distribuição espacial das raízes

O sistema radicular da cultura alcançou um valor máximo de 32 cm de profundidade e a concentração de 85% das raízes, profundidade efetiva, encontrou-se a uma profundidade de até 25 cm (Figura 22).

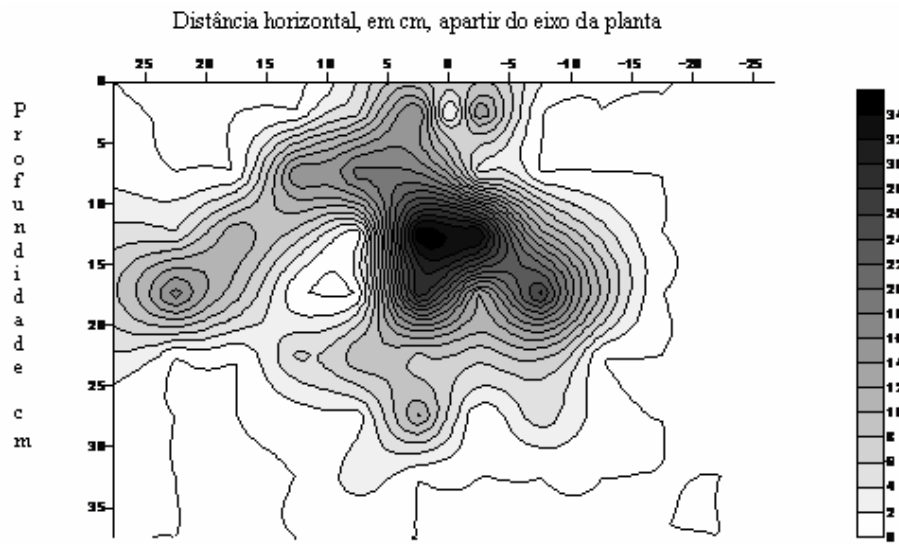


Figura 22 – Distribuição espacial do sistema radicular da melancia.

4.3.5 Avaliação do número de sensores por hectare, necessário ao manejo de irrigação

A Tabela 8 apresenta os valores médios de tempo de funcionamento necessário no sistema de irrigação (obtidos a partir da frequência) de acordo com o número de sensores utilizados para tomar a média, definido como sendo o tratamento (Apêndice A).

Tabela 8 - Tempo de funcionamento do sistema de irrigação com base no número de sensores a serem utilizados por hectare e a média de distância entre os emissores e sensores (e-s).

Tratamento	Linhas utilizadas	Média (e-s) (cm)	Média de tempo (min)
1	6	15,00	43,36
2	6, 20	20,15	55,24
3	6, 16, 24	21,05	46,93
4	6, 16, 24, 30	20,22	44,89
5	6, 13, 16, 20, 30	19,51	40,41
6	6, 13, 16, 20, 24, 30	20,97	50,42
7	6, 13, 16, 20, 24, 28, 30	20,61	51,58

Os resultados para análise do número de sensores por hectare, realizada no SAEG (Apêndice E) mostraram diferenças significativas entre as médias, para o tempo de irrigação, a um nível de significância de 5% para o teste de Tukey (Tabela 9).

Tabela 9 - Comparação entre médias, para o tempo de irrigação (min), segundo o número de sensores por hectare.

Tratamento	Dados	Médias (min)	Comparações
2	25	55,2	A
7	25	51,6	B
6	25	50,4	B
3	25	46,9	C
4	25	44,9	CD
1	25	43,4	D
5	25	40,4	E

* Fonte: SAEG/UFV

** Letras iguais não diferem estatisticamente ao nível de 5%.

Os resultados mostram que o maior valor de média foi no Tratamento 2, ou seja, da junção entre as linhas 6 e 20. Já o menor valor de média foi obtido no Tratamento 5, que englobava as linhas 6, 13, 16, 20 e 30.

Os resultados estatísticos provavelmente foram influenciados pelas distâncias entre os sensores e emissores (Tabela 06), pois quanto maior a distância menor será a umidade e por tanto maior a necessidade de funcionamento do sistema segundo o sensor.

4.3.6 Avaliação da estratégia de manejo

A lâmina de irrigação total durante o ciclo da cultura foi de 377,96 mm, sendo este um valor maior que os 335,2 mm apresentado por Bezerra & Oliveira (1999), trabalhando na determinação do kc da melancia com tensiômetros, em Fortaleza e menor que o mínimo de 400mm indicados por Doorenbos & Kassam (1979).

O tempo total de funcionamento do sistema de irrigação foi de 30,24 h para o bombeamento de 532,17 m³ com o manejo baseado nos dados do sensor, quando se estimou a lâmina total pelo balanço climatológico, utilizando-se dos valores de kc encontrados por Bezerra

& Oliveira (1999), o resultado foi de 325,23 mm, o que daria um volume total de 457,92 m³ e um tempo de funcionamento de 26,02h. A diferença de 52,73mm, a mais, comparando-se os dois métodos pode ser atribuída ao fato de elevar a umidade do solo a 17,0% enquanto sua capacidade de campo era de aproximadamente 13,5% (Figura 23) e ao fato deste experimento ter ocorrido em um período mais crítico, no que diz respeito aos fatores climáticos (setembro a novembro) do que o citado pelos autores (outubro a dezembro).

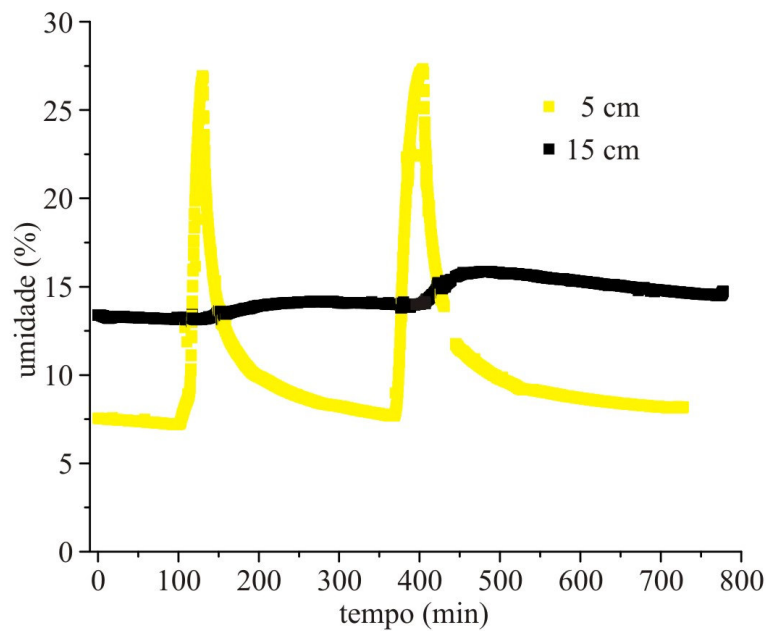


Figura 23 – Variação da umidade com o tempo

A Figura 24 apresenta o comportamento da demanda hídrica da melancia comparando-se os resultados dos dois manejos, BHS e BHC, para 31 observações durante o ciclo da cultura.

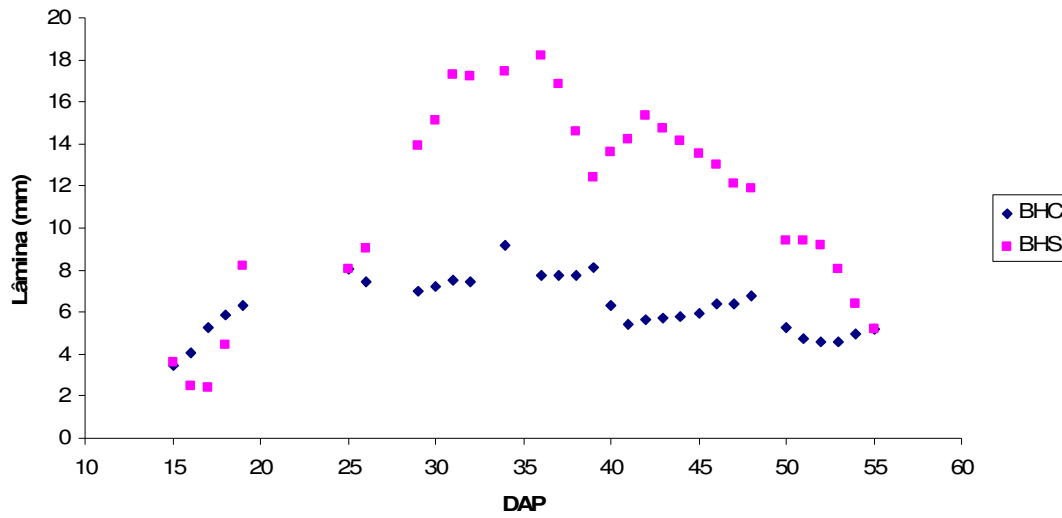


Figura 24 – Lâmina de irrigação em função da idade da cultura

A plotagem dos dados permitiu observar uma grande diferença entre os métodos no período de maior demanda hídrica, podendo ser explicada pelas prováveis situações abaixo:

1. O kc utilizado seria inadequado, já que fora estimado para um período de menor demanda hídrica potencial; e
2. O fato de se realizar duas leituras e conseqüentemente duas irrigações, aumentando desta forma o potencial evapotranspirativo.

A recomendação técnica realizada no Perímetro, prevê entre 700,0 a 800 m³ por hectare para uma produção de aproximadamente 40,0 t. A produtividade alcançada foi da ordem de 36,0 t ha⁻¹, não sendo maior devido, possivelmente, a um atraso ocorrido na adubação.

A eficiência de uso da água foi de 0,068 kg L⁻¹, enquanto que a eficiência local varia entre 0,05 e 0,057 kg L⁻¹, o que mostra a eficiência do sensor TOPDEA no manejo da irrigação.

A Figura 25 apresenta um resultado de, aproximadamente, setenta e duas horas de monitoramento contínuo da umidade do solo, iniciando-se às 10:00 h, possibilitando acompanhar de forma pontual a perda de água por evapotranspiração. A figura ratifica os resultados reportados por Miranda et al. (2001), no que tange a velocidade de resposta deste tipo de equipamento.

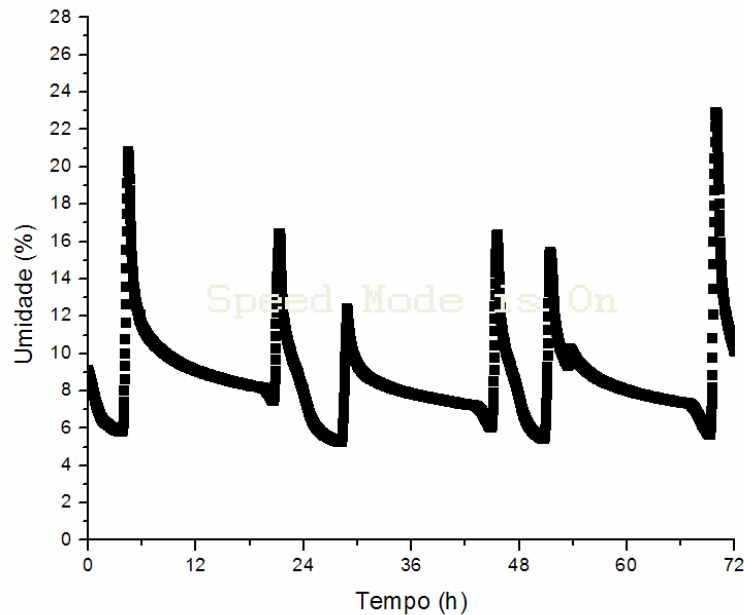


Figura 25 – Monitoramento da umidade na camada de 0 a 15cm do solo.

Apesar das áreas, onde foram realizados os experimentos, possuírem a mesma classificação (Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico) os mesmos tinham diferenças em seus perfis no que diz respeito a profundidade da camada com maior teor de argila. Na área da MaxFruit a camada mais argilosa encontra-se a aproximadamente 50 cm, enquanto que no Lote C07/1 tal camada tem início entre 25 e 30 cm. A comparação (impressional) do comportamento da curva de umidade da Figura 24, para um solo cultivado com a cultura da banana, e a curva apresentada na Figura 27, para um solo com a cultura da melancia, permite concluir que as curvas possuem formas semelhantes, concordando com Yoder et al. (1998) que trabalhando com sensores do tipo capacitivo, em solos argilosos e arenosos, não encontraram diferença na curva de umidade. Ruth (1999) trabalhando com um solo franco-argiloso e um outro franco-arenoso também não encontrou diferença significativa de comportamento.

4.3.7 Marcha de crescimento e absorção da cultura

A Tabela 10 apresenta a variação no crescimento do ramo principal, durante três observações, para os DAP 30 e 31, o crescimento total médio foi de 12,96 cm durante as 13,9 h

de observação. A maior média de crescimento foi na segunda observação, ocorrendo uma variação média de 5,43 cm em 2,83 h. Tal variação possivelmente seria maior caso a primeira observação tivesse sido realizada às 5:00 horas, quando a queda na umidade do solo, segundo a Figura 27, acentua-se persistindo até o momento da irrigação.

Tabela 10 - Crescimento do ramo principal em função do tempo

Planta	Horário de medição			Total (cm)
	5:35	8:25	12:40	
1	4,20	6,50	1,20	11,9
2	5,00	3,50	3,00	11,5
3	4,00	6,00	5,00	15,0
4	4,50	11,00	5,00	20,5
5	4,50	2,00	0,50	7,0
6	5,00	5,00	3,00	13,0
7	5,30	4,00	2,50	11,8
Média	4,64	5,43	2,89	12,96

A plotagem dos dados de crescimento das plantas (Figura 26), mostra que apesar da maior média ter ocorrido na segunda observação, esta dominância não ocorreu para todas as plantas observadas. As plantas cinco e sete apresentaram um maior crescimento na primeira observação.

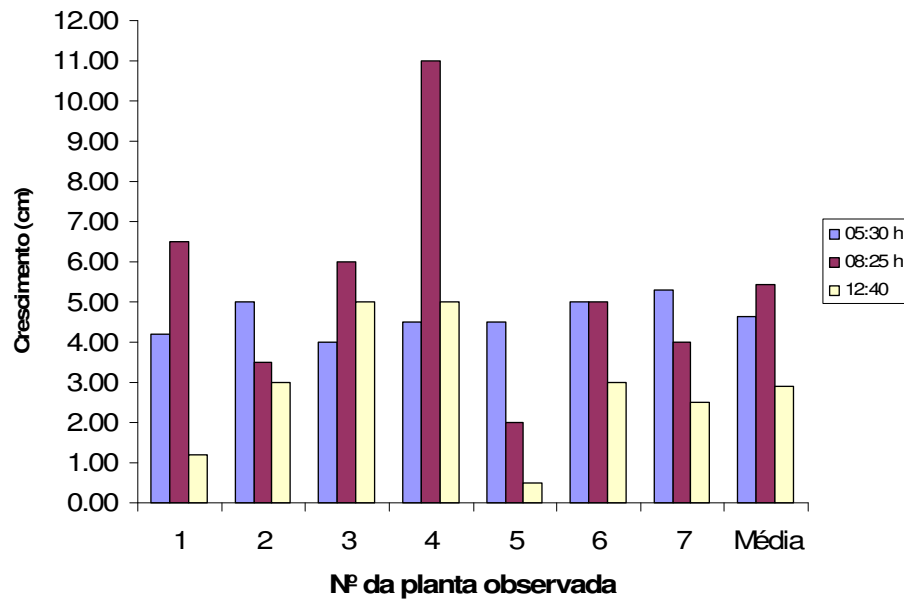


Figura 26 – Crescimento individual e médio das plantas observadas.

Praticamente quarenta e dois por cento (41,90%) do crescimento do ramo principal, observando-se o período de 22 h 46 min às 12 h 40 min, ocorreu entre 5 h 35 min e 8 h 25 min.

A Figura 27 representa uma diminuição na escala de tempo da Figura 25, o que permite observar uma redução de 2% na umidade entre 18 e 5 h, ao passo que a redução entre 5 e 6 h foi de 0,8%. Praticamente 28,6% da ETc ocorrida 18 às 6 h aconteceu na primeira hora de luz. Pela Figura 27, é possível identificar o comportamento distinto entre os períodos diurno e noturno, onde para a mesma variação de umidade há uma diferença de seis horas de evapotranspiração.

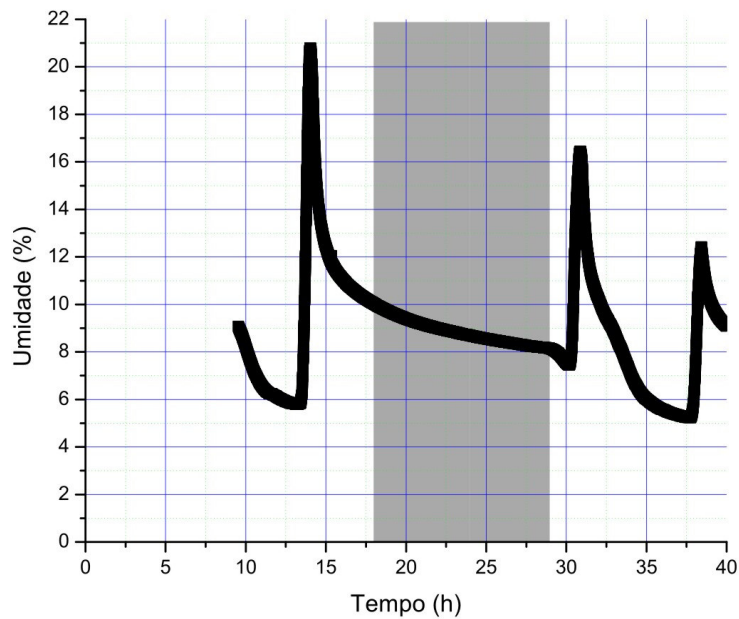


Figura 27 – Variação na umidade do solo em função do tempo.

5 CONCLUSÕES

O uso do sensor TOPDEA, no monitoramento da irrigação, apresentou-se preciso e eficiente.

O sensor permite medir a umidade em tempo real e acompanhar a mesma de forma contínua, possibilitando desta forma, o perfeito fracionamento da irrigação.

Tanto o BHS quanto BHC, utilizaram um volume de água menor que o recomendado, atualmente, no Perímetro estudado.

A eficiência de uso da água foi de 16,18% a 26,47% maior que a ocorrida normalmente no Perímetro. Tal fato nos permite concluir também que o manejo da irrigação adotado neste trabalho, possibilitou uma maior eficiência da irrigação.

Dada a característica de armazenamento do solo, deve-se fracionar a irrigação com a primeira ocorrendo nas primeiras horas da manhã. Assim, a irrigação noturna de uma grande lâmina (prática comum do Perímetro) conduz à baixa eficiência da irrigação.

A distância entre o sensor e o emissor tem influência direta na resposta do mesmo.

6 RECOMENDAÇÕES

Realizar um estudo onde seja possível obter dados de uma grade de sensores em duas dimensões, de forma a possibilitar a mensuração das respostas em função da distância emissor-sensor.

Realizar um experimento com diferentes taxas de consumo e acompanhamento do crescimento da planta durante todo o ciclo.

Realizar um experimento com diferentes texturas de solo e culturas, afim de identificar a necessidade ou não de calibração específica do sensor TOPDEA.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. S. ; COSTA, A. A. ; OLIVEIRA, J. C. P. et al. **Modelagem atmosférica da porção Norte do Nordeste brasileiro utilizando dados do projeto EMAS**. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2002, Foz do Iguaçu, 2002.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma, FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p.

BASSOI, L. H.; SILVA, J. A. M.; ALENCAR, C. M.; JORGE, L. A. C.; HOPMANS, J. W. **Digital image analysis of root distribution towards improved water and soil management: grapevine and date palm study cases**. (compact disk) In: ASAE INTERNATIONAL ANNUAL MEETING, Milwaukee, 2000. Technical paper St. Joseph: ASAE, 2000.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, Impr. Univ., 1989.

BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. **Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.2, p.173-177, 1999. Campina Grande, PB.

CASALI, V. W. M.; SONNENBERG, P.E. & Pedrosa, J.F. **Melancia: Cultivares e métodos culturais**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.8, n.85, p.29-32, 1982.

CHANZY, D. K.; CHADOEUF, J.; GAUDU, J-C.; MOHRATH, D.; RICHARD, G.; BRUCKLER, L. **Soil moisture monitoring at the field scale using automatic capacitance probes**. European journal of soil science, Avignon, v. 49, n. 4, p. 637-648, 1998.

CHAVES, L. C. G.; ANDRADE, E. M.; CRISOSTOMO, L. A.; NESS, R. L. L.; LOPES, J. F. B. **Risco de degradação em solo irrigado do Distrito de Irrigação do Perímetro Araras Norte, Ceará**. Ciência Agronômica, v.37, n.3, p.292-298, 2006.

COELHO, S. L. **Desenvolvimento de um tensiômetro eletrônico para monitoramento do potencial de água no solo**. 2003. 106 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará.

COSTA, C. A. G.; FREITAS, C. A. S.; ODÍSIO, C. V.; MOTENEGRO, A. A. T.; TEIXIERA, A. S.; MOREIRA, L. C. J. **Caracterização do sistema radicular do abacaxizeiro irrigado por gotejamento**. XXXVI Congresso Brasileiro de Engenharia agrícola. Anais. SBEA. Bonito, MS. 2007.

DEAN, T.J.; BELL, J.P.; BATY, A.J.B. **Soil moisture measurement by improved capacitance technique**. Part I. Sensor design and performance. Journal Hidrology, v. 93, p. 67-78, 1987.

DIRKSEN, C. **Soil physics measurements**. Reiskirchen: Catena-Verlag, 1999. 154 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de GHEYI, H. et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p.

DOORENBOS, J.; PRUIT, W. O. **Crop water requirements**. Roma: FAO, 1992.

DURNEY, C. H. **Circuitos elétricos: teoria e aplicação em engenharia**. Rio de Janeiro: Campus, 1985. 485 p.

FAO. **Sustainable management of water resources for agricultural development**. In: The world of agriculture. Hong Kong: FAO, 1993. p.110-112.

FAO. **Es necesario mejorar las prácticas agrícolas**. Março de 2007. Disponível em: <https://www.fao.org.br/vernoticias.asp?id_noticia=46>. Acesso em: 19 out. 2007.

FAVARIN, J.L.; VILLA NOVA, N.A.; ANGELOCCI, L.R.; DOURADO-NETO, D.;

BERNARDES, M.S. **Estimativa do consumo hídrico do cafeeiro em função de parâmetros climatológicos**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.9, n.2, p.235-240, 2002.

FERREIRA, M. N. L. **Distribuição radicular e consumo de água de goiabeira (*Psidium guajava L*) irrigada por microaspersão em Petrolina-PE**. 2004. 106 f, Tese (Doutorado em irrigação): Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

HICKEY, H. V. **Elements of electronics**. New York: McGraw-Hill, 1961. 549 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. London: Academic Press, 1980. 413 p.

KLAR, A.E. **Água no sistema**. 2ª ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

KLAR, A. E. **Irrigação: frequência e quantidade de aplicação**. São Paulo: Nobel, 1991. 157p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no Solo**. Editado pelo autor, 1999. 497 p.

LEY, T. W., R. G. STEVENS, R. R. TOPIELEC, W. H. NEIBLING. **Soil water monitoring and measurement**. Paper PNW 475. A Pacific Northwest Publication. 1994. 52p.

MERRIAM, J. L., KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. 271p.

MIRANDA, J.H.; PIRES, C.M.P. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, 2001. 410p.(Série Engenharia Agrícola, 1).

MONTENEGRO, A. A. T.; GONDIM, R. S.; BEZERRA, M. A.; COSTA, C. A. G.; SABINO, K. V. **Distribuição do sistema radicular da bananeira na microrregião do Baixo Jaguaribe, Ceará**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Fruticultura, 2004, Florianópolis. XVIII Congresso Brasileiro de Fruticultura. Florianópolis : SBF, 2004.

NADLER, A.; LAPID, Y. **An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture**. Australian Journal of Soil Research, Collingwood, v. 34, n. 3, p. 361-368, 1996.

NOBORIO, K. **Measurements of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review**. Computer and Electronics in Agriculture, Amsterdam, v. 31, n. 11, p. 213-237, 2001.

OLITTA, A. F. L. **Os métodos de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1987. 267p.

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. **Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration**. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison-WI, v. 61, 1576-1585, nov-dec, 1997.

PLATER, C.V. **A portable capacitance-type soil moisture meter.** Soil Science, v. 80, p. 391-395, 1955.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

RENDE, A.; BIAGE, M. **Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils.** J. Braz. Soc. Mech. Sci., vol. 24, no. 3, p. 266-233. 2002.

ROTH, C. H.; MALICKI, M.A.; PLAGGE, R. **Empirical evaluation of the relationship between soil and dielectric constant and the volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR.** Journal of soil science, Oxford, v. 43, p. 1-13, 1992.

RUTH, B. **A capacitance sensor with planar sensitivity for monitoring soil water content.** Soil Sci. Soc. Am. J., v. 63, p. 48-54, 1999.

SILVA, E. N. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da bananeira pelo método do balanço hídrico nas condições do Vale do Curu.** 2004. 68 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará.

SILVA, I. O. ; TEIXEIRA, A. S. ; CANAFISTULA, F. J. F.; LEÃO, R. A. O. **Development of a capacitive sensor for monitoring soil moisture.** In: 2005 ASAE Meeting, 2005, Tampa Bay. Proceedings of the 2005 ASAE Meeting. St. Joseph : ASAE, 2005.

SOARES, J. I.; COSTA, R. N. T.; SILVA, L. A. C.; GONDIM, R. S. **Função de resposta da melancia aos níveis de água e adubação nitrogenada, no Vale do Curu, CE.** Rev. bras. eng. agríc. ambient.v.6 n.2. Campina Grande. 2002.

THOMAS, A.M. **In situ measurement of moisture in soil similar substances by ‘fringe’ capacitance.** J. Sci.Instrum., v. 43, p. 21-27, 1966.

TOPP, G. C.; DAVIS, J.L. ; ANNAN, A. P. **Eletromagnetic determination of soil watercontent:** measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, New York, v. 16, p. 574-582, 1980.

WOBSHALL, D. 1978. **A frequency shift dielectric soil moisture sensor.** IEEE Trans. Geoscience Electronics 16: 112-118.

YODER, R.E.; JOHNSON, D.L.; WILKERSON, J.B.; YODER, D.C. **Soil water sensor performance.** American Society of Agricultural Engineers, v. 14, n. 2, p. 121-133, 1998.
ZAZUETA, F. S.; XIN, J. **Soil Moisture Sensors.** Gainesville: University of Florida, 1994. 12 p. (Bulletin, 292).

APÊNDICES

APÊNDICE A - Planilha para conversão das leituras das respostas dos sensores em tempo de irrigação, considerando a área molhada e a vazão do sistema

Vazão (m³/h)= 17,6 Ucc (cm³/cm³)= 0.1700 k= 1778371018
 Área (ha)= 0,1408 L (mm)= 100 a= -2.389421295

$$\theta = k * F^a \qquad T = \frac{(U_{cc} - U_a) * L * A * 10}{Q} * 60$$

Data	Leitura	Frequência (kHz)	Umidade (m ³ . m ⁻³)	Tempo (min)
03/11/2007	1	3550	0.0585	53.53
	2	3220	0.0738	46.16
04/11/2007	1	3740	0.0516	56.82
	2	3520	0.0597	52.95
05/11/2007	1	3700	0.0530	56.17
	2	3600	0.0566	54.45
06/11/2007	1	3415	0.0642	50.80
	2	3410	0.0644	50.70
07/11/2007	1	3100	0.0809	42.79
	2	2700	0.1125	27.61
08/11/2007	1	3100	0.0809	42.79
	2	2800	0.1031	32.11
09/11/2007	1	3400	0.0648	50.48
	2	2930	0.0925	37.19
10/11/2007	1	3500	0.0605	52.56
	2	2930	0.0925	37.19
11/11/2007	1	3100	0.0809	42.79
	2	3200	0.0749	45.63
12/11/2007	1	3115	0.0799	43.24
	2	2930	0.0925	37.19
13/11/2007	1	3500	0.0605	52.56
	2	3050	0.0841	41.25
14/11/2007	1	2980	0.0888	38.95
	2	3080	0.0821	42.19
15/11/2007	1	3085	0.0818	42.34
	2	2700	0.1125	27.61
16/11/2007	1	2700	0.1125	27.61
	2	3000	0.0874	39.63

APÊNDICE B - Planilha para conversão das leituras da evapotranspiração da cultura em tempo de irrigação, considerando os dados de área molhada e a vazão do sistema, iguais aos usados no

manejo com o sensor TOPDEA. $T(h) = \frac{Etc * A * 10}{Q}$

Dia juli.	T. Min. (°C)	T. Max. (°C)	T. Méd. (°C)	V. vento (m s ⁻¹)	HR (%)	Radi solar (Mj m ⁻² dia ⁻¹)	Eto (mm)	DAP (dia)	ETc (mm)	Tempo (horas)
274	23.42	34.69	27.47	4.90	62.71	25.21	6.83	12	3.38	0.270
275	22.82	34.96	27.19	4.40	64.21	24.45	6.48	13	3.37	0.270
276	23.42	33.90	27.37	4.53	63.16	23.54	6.30	14	3.43	0.275
277	22.82	34.89	27.57	4.28	62.17	23.83	6.45	15	3.68	0.294
278	24.02	33.77	27.43	4.67	62.76	18.01	5.90	16	3.51	0.281
279	22.75	34.43	27.40	4.44	63.14	25.10	6.49	17	4.03	0.322
280	21.90	33.23	26.43	4.03	68.10	21.53	5.48	18	3.54	0.283
281	22.89	33.50	26.84	4.55	65.92	23.93	6.10	19	4.09	0.327
282	23.28	34.96	27.49	5.13	62.63	25.79	7.06	20	5.05	0.404
283	24.22	34.83	27.95	5.30	60.16	23.95	7.13	21	5.43	0.435
284	24.42	35.22	27.89	4.86	60.53	25.49	7.10	22	5.74	0.459
285	24.88	34.83	27.91	5.11	60.35	24.76	7.10	23	6.07	0.486
286	23.62	33.96	27.41	5.03	62.95	25.68	6.76	24	6.09	0.487
287	24.42	33.90	27.80	5.23	60.94	24.81	6.91	25	6.54	0.523
288	23.88	34.03	27.84	5.04	60.78	24.44	6.81	26	6.76	0.541
289	23.42	33.16	27.55	4.83	62.30	24.04	6.39	27	6.64	0.531
290	22.42	34.36	27.21	4.27	64.16	25.06	6.34	28	6.88	0.550
291	23.28	32.3	27.01	4.80	64.94	21.64	5.84	29	6.61	0.528
292	21.23	33.23	26.15	4.18	69.58	23.02	5.61	30	6.61	0.528
293	23.27	33.5	26.76	4.40	66.36	23.27	5.96	31	7.29	0.584
294	23.22	33.03	26.80	4.02	66.08	20.67	5.48	32	6.96	0.556
295	22.09	33.1	26.63	4.18	67.04	22.43	5.66	33	7.15	0.572
296	22.42	33.9	26.87	4.16	65.87	23.26	5.94	34	7.47	0.597
297	22.56	33.83	27.06	3.88	64.91	23.53	5.86	35	7.32	0.586
298	23.88	35.09	27.78	5.03	61.08	24.78	7.06	36	8.77	0.701
299	23.15	34.83	27.96	5.32	60.18	25.06	7.21	37	8.91	0.713
300	22.89	33.96	27.46	4.78	62.76	24.78	6.56	38	8.06	0.645
301	22.89	33.76	27.27	4.31	63.77	24.24	6.19	39	7.56	0.605
302	23.15	34.03	27.48	4.13	62.68	24.59	6.23	40	7.57	0.606
303	23.68	33.76	27.40	4.85	63.00	22.31	6.34	41	7.65	0.612
304	23.55	34.49	27.41	4.82	62.98	24.65	6.68	42	8.02	0.642

APÊNDICE C - Dados para calibração da célula de carga, através de análise de regressão, peso acumulado e contador digital

Nº do cilindro	Peso do cilindro (g)	Peso acumulado (g)	Média de leitura da célula de carga (Contador digital)
1	750.40	18604.45	3835.57
2	748.53	17854.05	3704.29
3	745.47	17105.52	3579.86
4	731.97	16360.05	3446.83
5	729.91	15628.08	3319.74
6	741.03	14898.17	3192.23
7	744.70	14157.14	3062.68
8	752.47	13412.44	2934.33
9	743.97	12659.97	2804.33
10	743.88	11916.00	2675.04
11	726.94	11172.12	2546.59
12	738.25	10445.18	2419.76
13	746.07	9706.93	2291.34
14	732.41	8960.86	2161.98
15	765.85	8228.45	2033.52
16	729.54	7462.60	1902.32
17	751.11	6733.06	1777.36
18	743.88	5981.95	1644.83
19	749.56	5238.07	1515.26
20	757.78	4488.51	1384.16
21	743.65	3730.73	1251.87
22	754.95	2987.08	1122.40
23	732.88	2232.13	989.20
24	752.95	1499.25	859.32
25	746.30	746.30	725.56
		0.00	589.21

APÊNDICE D - Análise de variância para o efeito da distancia de instalação dos sensores na leitura dos mesmos

Data	Universidade Federal do Ceará Antonio Dimas S. de Oliveira	Hora
01/02/2008	Efeito da distância emissor-sensor na leitura	08:26:32

DESCRIÇÃO DO ARQUIVO

Tipo de Leitura - Microsoft Excel

Variáveis	Mínimos	Máximos	Perdidos	Válidos
TRAT	1.000000	8.000000	0	200
REP	1.000000	13.00000	0	200
LEITURA	2515.000	4640.000	0	200

Observações Gravadas: 200

Variáveis Totais: 3

Valores Perdidos: 0

Procedimento = Análise para modelos lineares

Objetivo = Análise de variância

Dependentes = LEITURA

Independentes= TRAT REP

Nome	Média	Desvio
LEITURA	3808.39500	556.41593

Determinante = 0.1375326E-03

Análise de Variância

LEITURA

Fontes de Variação	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Signif.
TRAT	7	0.5615045E+08	8021492.	334.784	0.00000
REP	12	1146852.	95571.02	3.989	0.00002
Resíduo	180	4312839.	23960.21		

Coefficiente de Variação = 4.064

APÊNDICE E - Análise de variância para o efeito do número de sensores por hectare no tempo de irrigação

----- Data 14/01/2008 -----	Universidade Federal do Ceará Antonio Dimas S. de Oliveira Número de sensores por hectare -----	----- Hora 13:39:34 -----
--------------------------------------	--	------------------------------------

DESCRIÇÃO DO ARQUIVO

Tipo de Leitura - Microsoft Excel

Variáveis	Mínimos	Máximos	Perdidos	Válidos
TRAT	1.000000	7.000000	0	175
REP	1.000000	13.000000	0	175
TEMPO	27.61291	124.5555	0	175

Observações Gravadas: 175

Variáveis Totais: 3

Valores Perdidos: 0

Procedimento = Análise para modelos lineares

Objetivo = Análise de variância

Dependentes = TEMPO

Independentes= TRAT REP

Observações Perdidas = 0

Observações Válidas = 175

Nome	Média	Desvio
TEMPO	70.30175	25.09528

Determinante = 0.2406820E-03

Análise de Variância

TEMPO

Fontes de Variação	G.L.	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	F	Signif.
TRAT	6	95615.14	15935.86	589.273	0.00000
REP	12	9746.665	812.2221	30.034	0.00000
Resíduo	156	4218.746	27.04324		

Coefficiente de Variação = 7.397