

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

PERFORMANCE E CALIBRAÇÃO DE UM SENSOR TIPO TDR EM SOLOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO, BRASIL

* Severino Martins dos Santos Neto ¹
Antonio Celso Dantas Antonino ¹
Artur Paiva Coutinho ²
Carlos Alexandre de Almeida Barros ³
Willames de Albuquerque Soares ⁴

PERFORMANCE AND CALIBRATION OF A TDR TYPE SENSOR IN THE STATE OF PERNAMBUCO SOILS, BRAZIL

Recibido el 27 de marzo de 2018; Aceptado el 28 de agosto 2019

Abstract

Soil moisture is an essential variable in several studies of the soil-plant-atmosphere system. Time Domain Reflectometry (TDR) is an indirect method of determining moisture, which stands out for its operational versatility, being widely used for monitoring soil moisture. Aiming to optimize the method, this work dimensioned the operating region of a TDR type sensor, evaluated the performance of a quadratic equation provided by the manufacturer and calibrated the equipment to three contrasting textural classes. The sensor operating region was verified with the interaction of the sensor with air + water + soil. The performance evaluation of the quadratic equation and the calibrations were performed by the saturation process of the three textural classes under controlled conditions. The results allowed to conclude that: (i) the range of the CS616 humidity sensor is approximately 3 cm and does not vary when used in different types of soils; (ii) the quadratic model did not perform well in estimating volumetric moisture, underestimating 20% for sandy soil, and overestimating in 34% for clayey soils; (iii) a third degree model, presented a good fit, with a coefficient of determination above 95%.

Keywords: soil moisture, time domain reflectometry, water storage in soil.

¹ Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

² Núcleo de Tecnologia do Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

³ Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Brasil.

⁴ Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Brasil.

*Autor correspondente: Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Professor Luiz Freire, nº 1000, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, 50740-545, Brasil. Email: martinsdsn@gmail.com

Resumo

A umidade do solo é uma variável imprescindível em vários estudos do sistema solo-planta-atmosfera. A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) é um método indireto de determinação de umidade, que se destaca pela sua versatilidade operacional, sendo bastante utilizado para monitoramento da umidade em perfis de solos. Visando a otimização do método, este trabalho dimensionou a região de atuação de um sensor tipo TDR, avaliou o desempenho de uma equação quadrática fornecida pelo fabricante e calibrou o equipamento para três classes texturais contrastantes. A região de atuação foi verificada com a interação do sensor com o ar + água + solo. O desempenho da equação quadrática e as calibrações foram realizadas pelo processo de saturação das três classes texturais em condições controladas. Os resultados permitiram concluir que: (i) o alcance do sensor de umidade CS616 é de aproximadamente 3 cm e não varia quando utilizado em diferentes tipos de solos; (ii) o modelo quadrático não apresentou bom desempenho em estimar a umidade volumétrica, subestimando em 20% para o solo arenoso, e superestimando em 34% para os solos argilosos; (iii) um modelo de terceiro grau, apresentou bom ajuste, com coeficiente de determinação superiores a 95%.

Palavras chave: armazenamento da água no solo, calibração, umidade do solo.

Introdução

Mensurar a umidade do solo é de fundamental importância em várias aplicações pertinentes na agricultura e hidrologia (Romano, 2014; Cristi *et al.*, 2016; Nasta *et al.*, 2018). No campo da agricultura o monitoramento da umidade do solo é de vital importância para otimizar o rendimento das culturas e a eficiência do uso da água (Lekshmi *et al.*, 2014; Consoli *et al.*, 2016; Kalita *et al.*, 2016). Em hidrologia esta variável controla a separação da precipitação em infiltração, evaporação e escoamento superficial (Corradini, 2014).

Dentre os vários métodos de medida da umidade do solo, o gravimétrico, que apesar de ser considerado padrão, normalmente é evitado. Pois é demorado e não permite a repetição da medida no mesmo local (Uniyal *et al.*, 2017). Métodos como a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) que se baseiam na constante dielétrica do solo, são ideais para estudos de monitoramento da umidade no perfil do solo. Pois possibilitam monitorar em tempo real, continua e simultaneamente em várias profundidades com precisão, permitindo a automação do recolhimento dos dados com praticidade, rapidez e robustez (Laloy *et al.*, 2014; Zanetti *et al.*, 2015; Ponciano *et al.*, 2016).

A técnica TDR apresenta como desvantagem o pouco conhecimento sobre o seu comportamento em solos tropicais, pois são solos muito intemperizados e apresentam altos teores de argila e matéria orgânica (Zanetti *et al.*, 2015), tornando fundamental desenvolver equações de calibração específica para os diferentes tipos de solos de interesse, restringindo a utilização de uma única equação para diferentes solos. Vários estudos demonstram que a equação universal proposta por Topp *et al.* (1980) não é adequada para solos tropicais (Villwock *et al.*, 2004; Milani *et al.*, 2008). Tommaselli e Bacchi (2001) mostraram que em cinco tipos de solos na região de Piracicaba-SP, a equação de Topp *et al.* (1980) e a equação embutida no equipamento Trase I não

são aplicáveis aos solos estudados. Alguns trabalhos efetuaram a calibração de um equipamento tipo TDR em condições de campo (Villwock *et al.*, 2004; Chicota e Jong, 2004). No entanto, a dificuldade de controle de algumas variáveis em campo, como o avanço da frente de umedecimento e a umidade volumétrica, viabiliza a realização das calibrações em laboratórios com maior frequência e confiabilidade, como em alguns trabalhos brasileiros (Manieri *et al.*, 2007; Milani *et al.*, 2008; Almeida *et al.*, 2012; Zanetti *et al.*, 2015).

Apesar da literatura apresentar trabalhos que objetivem a determinação de equações de calibração de sensores, ainda são escassas pesquisas que investiguem a eficiência dos sensores na mediação da umidade em relação à espessura do solo. A determinação da espessura de solo que o sensor está medindo a umidade, influencia diretamente no dimensionamento e nos custos associados ao planejamento da disposição e da quantidade de sensores que se pretende utilizar para monitoramento de um perfil de solo.

O intuito deste trabalho é demonstrar a capacidade real de um sensor monitorar a umidade do solo em condições controladas de laboratório. Para isso foram utilizados solos de três locais do estado de Pernambuco, nordeste brasileiro. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o alcance do sensor tipo TDR em condições de exposição: sonda - ar, sonda - água, sonda - solo. Uma vez determinado o alcance foram avaliados a performance da equação fornecida pelo fabricante e posteriormente efetuada a calibração para os três solos coletados. Este trabalho reporta os resultados da dissertação de Santos Neto (2015), que utilizou como estudo de caso solos do estado de Pernambuco (Brasil), visando avaliar a performance e calibrar sensores de umidade do solo do tipo TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo).

Metodologia

Foram coletados solos em três municípios do estado de Pernambuco (Figura 1). No município de São João-PE, situado na mesorregião do Agreste meridional do estado (Figura 1), os solos coletados foram classificados como Neossolo Regolítico Eutrófico Típico (Almeida *et al.*, 2015). No município de Serra Talhada-PE, localizado na microrregião do Vale do Pajeú (Figura 1), os solos foram classificados como Luvisolo Crômico (Santos *et al.*, 2013). Um tipo de solo urbano, oriundo de aterro, foi coletado no município de Recife-PE, na microrregião do Recife (Figura 1).

Os parâmetros físicos do solo como a análise granulométrica e classificação textural foi realizada pelo método que combina sedimentação de partículas finas e peneiramento do material grosseiro no laboratório de Física de solos no Departamento de Energia Nuclear da UFPE. O sensor TDR utilizado é do modelo CS616 da Campbell sci. compostas por duas hastes com dimensões de 30 cm de comprimento, 0,32 cm de diâmetro e 3,2 cm de afastamento entre si. A informação da umidade volumétrica é derivada a partir da constante dielétrica, que varia com a umidade do

meio que circunda as hastes (guia de ondas). A resposta do CS616 é um sinal elétrico e funciona conectado a uma central de aquisição de dados, modelo CR10X.

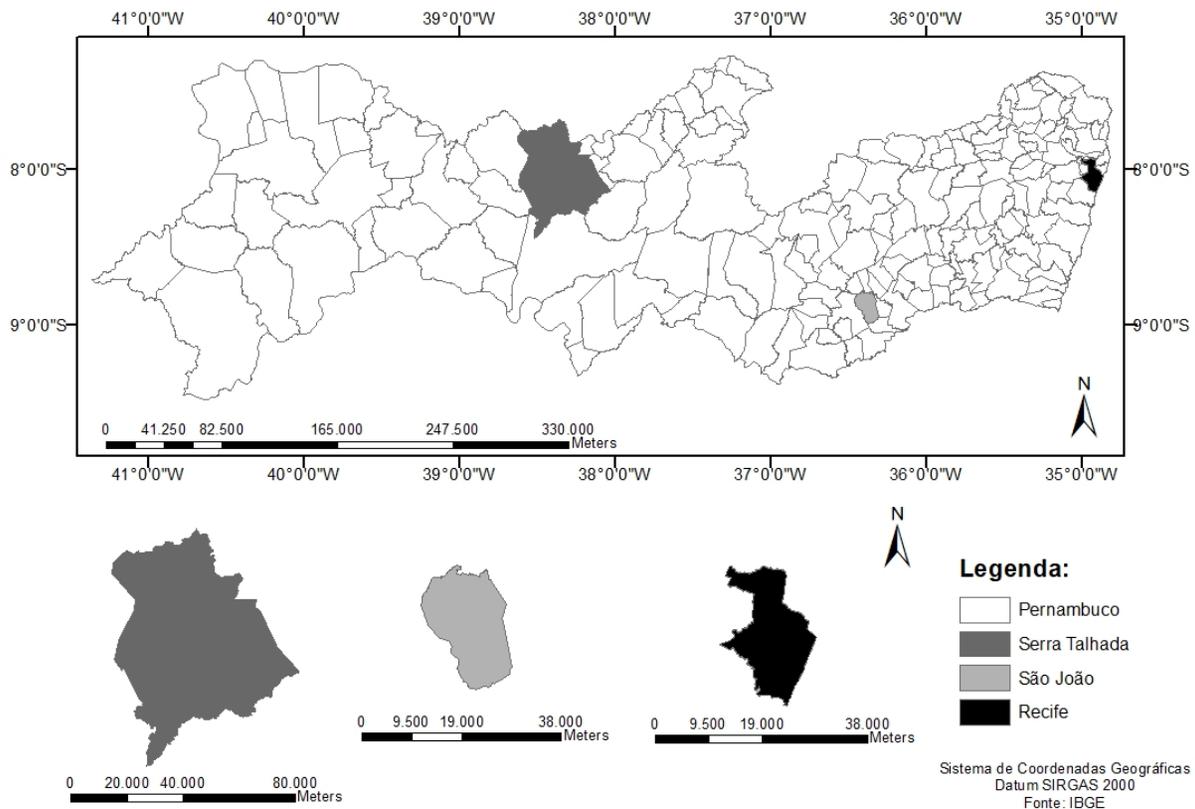


Figura 1. Mapa de Pernambuco com os municípios escolhidos para a coleta de solo.

O princípio de funcionamento consiste em escalonar, os curtos tempos de propagação, em períodos de saída cujos valores variam entre 14,9 e 43,6 μ s. Esses períodos são correlacionados com a umidade volumétrica, através de uma equação quadrática (Equação 1), extraída do próprio manual do equipamento.

$$\theta_v = -0,063 - 0,0063 \cdot t + 0,0007 \cdot t^2 \quad \text{Equação (1)}$$

onde, θ_v é a umidade volumétrica do solo (m^3/m^3 ou %), t é o período de saída do sensor (μ s).

Em de todos os experimentos foram utilizados recipientes plásticos modelo OR-02 da empresa Container, com 33 cm de comprimento, 19 cm de largura e 25 cm de altura. Este recipiente foi

utilizado para acoplamento do CS616, acomodação do solo e um sistema de irrigação com 18 gotejadores na tampa do recipiente.

Determinação do Alcance do Sensor

O objetivo desse experimento é determinar qual a região limite em torno do guia de ondas que de fato mensura o conteúdo de água, ou seja, qual a espessura é sensível a variação de umidade acima e abaixo do guia de ondas. Na execução do experimento, o sensor foi inserido a 9 cm do fundo do recipiente e preenchido com água destilada até esse mesmo nível. A execução consiste em elevar o nível da água até alcançar 18 cm de altura, registrando os períodos de saída a cada 0.5 cm. Segundo o manual do sensor (Campbell, 2011), o valor dos períodos de saída para o sensor totalmente imerso em água é de 43.6 μ s e exposto ao ar livre é de 14.3 μ s. Desta forma, é possível relacionar os valores dos períodos de saída do sensor com os diferentes níveis de água. A representação de algumas etapas desse experimento pode ser observada na Figura 2.

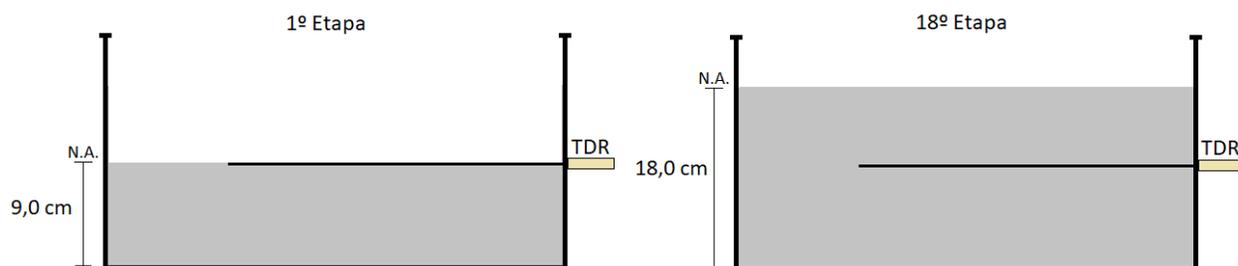


Figura 2. Esquema com diferentes etapas do experimento variando os níveis de água.

Simulação de Irrigação em Condições Controladas

O intuito desse experimento é saturar uma amostra de solo, controlando algumas variáveis como: o avanço da frente de molhamento, o período de saída do sensor e a umidade do solo medida e estimada. Esse experimento foi executado para as três classes texturais do solo. Inicialmente o solo foi destorreado e a secagem foi realizada em uma estufa de aquecimento até peso constante. A irrigação foi realizada com bombas peristálticas do modelo IPC-12 da Ismatec. Todo o dispositivo experimental foi montado sobre uma balança de pesagem eletrônica, modelo 2098 da Toledo, com capacidade máxima 30 kg e sensibilidade de 0.005 kg.

O sensor foi acoplado no ponto equidistante das paredes do recipiente e no ponto médio da altura em relação ao preenchimento do solo. A inserção do sensor ocorreu na lateral do recipiente, com o cuidado para que não se formem bolhas de ar entre o solo circundante e o guia de ondas, interferindo nas medidas. O sensor CS616 foi conectado à central de aquisição de dados, que por sua vez foi conectada a uma bateria de 12 V. A central permite monitorar e coletar os períodos de saída em microssegundos (μ s). A central de aquisição de dados, foi programada

para medir os períodos de saída do pulso por segundo, na coleta dos dados os valores são expressos por minuto através da média dos valores obtidos por segundo.

Em conjunto com os demais equipamentos listados, também foram utilizados um reservatório de água para a irrigação e um cronômetro digital. A porosidade do solo e conseqüentemente quantidade de água necessária para saturar o solo foram calculadas pela Equação 2 e 3.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_t} \quad \text{Equação (2)}$$

$$P(\%) = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}\right) \cdot 100 \quad \text{Equação (3)}$$

em que, m_s é a massa de solo seco (kg), V_t é o volume total do solo (m^3), ρ_s é a massa específica do solo ($kg \cdot m^{-3}$), ρ_p é massa específica das partículas ($2650 \text{ kg} \cdot m^{-3}$) e P é a Porosidade do Solo (%).

O início do experimento ocorre com o acionamento da irrigação, com o objetivo de se registrar a massa do sistema por minuto, até que o solo sature. A massa dos utensílios do dispositivo experimental foi descontada, utilizando para os cálculos apenas a massa de solo e a massa de água irrigada. O incremento da umidade gravimétrica, foi calculada pela Equação 4 e transformada em volumétrica pela Equação 5.

$$\theta_g = \frac{m_a}{m_s} \quad \text{Equação (4)}$$

$$\theta_v = \theta_g \cdot \rho_s \quad \text{Equação (5)}$$

em que m_a é a massa de água (kg), m_s a massa de solo seco (kg), ρ_s a massa específica do solo ($kg \cdot m^{-3}$), θ_g a umidade gravimétrica ($kg \cdot kg^{-1}$ ou %) e θ_v a umidade volumétrica ($m^3 \cdot m^{-3}$ ou %).

Utilizando a configuração experimental apresentada, foi possível realizar três tipos diferentes de experimentos, apenas variando o preenchimento e o local de acoplamento do sensor, bem como, o modelo de irrigação. Os experimentos, objetivos e suas respectivas variações são descritos abaixo.

Experimento (A): Visa verificar se a região de atuação do sensor determinado no experimento anterior (Ar + Água), é a mesma quando o sensor é utilizado nas três classes texturais. Com o auxílio de uma régua milimétrica em conjunto com a configuração experimental já apresentada (Figura 3A), é possível monitorar os períodos de saída (μs) em função do avanço da frente de molhamento.

Experimento (B): Visando a avaliação da performance do sensor, o recipiente será preenchido com o volume de solo que corresponde a região de atuação ou alcance do sensor (Figura 3b). A avaliação consiste em confrontar os valores da umidade volumétrica medidas

experimentalmente, com os valores das umidades volumétricas estimadas a partir da equação quadrática, extraída do manual do equipamento. Quatro critérios estatísticos foram utilizados para a análise dos dados calculados através da equação quadrática, o erro quadrático médio, EQM (Equação 6); a razão de desvios, RD (Equação 7); a eficiência da modelagem, EM (Equação 8); coeficiente de massa residual, CMR (Equação 9); coeficiente de determinação, R^2 (Equação 10).

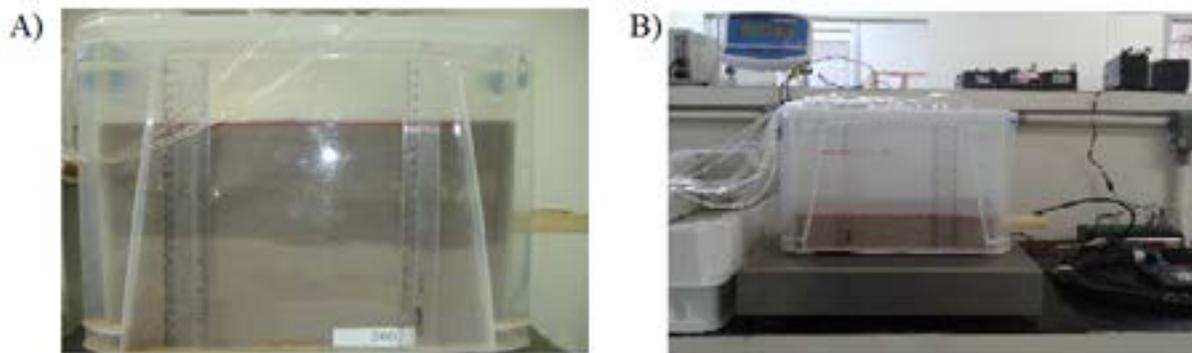


Figura 3. A) Dispositivo experimental visando dimensionar o alcance do sensor; B) Dispositivo experimental para avaliação da performance e calibração do sensor.

O valor do Erro Quadrático Médio (EQM) indica o grau de desvio entre as determinações experimentais e os valores calculados pelo modelo teórico, o valor esperado de EQM tende a zero. A razão de desvio (RD) descreve a razão entre o espalhamento dos valores calculados pelo modelo teórico. A Eficiência de modelagem (EM) indica se o modelo teórico fornece uma estimativa melhor das determinações experimentais que o valor médio dessas determinações, assim como o RD seu valor esperado tende a 1 (um). O coeficiente de massa residual (CRM) tende a zero na ausência de desvios sistemáticos entre valores teóricos e experimentais, como também indica se o modelo tende a superestimar ou a subestimar, com valores de CRM negativos ou positivos, respectivamente. O R^2 é o coeficiente de determinação, varia entre 0 e 1, indicando o quanto o modelo consegue explicar os valores medidos.

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{100}{M} \quad \text{Equação (6)}$$

$$RD = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2}{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{M})^2} \quad \text{Equação (7)}$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 - \sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad \text{Equação (8)}$$

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^N M_i - \sum_{i=1}^N T_i}{\sum_{i=1}^N M_i} \quad \text{Equação (9)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2} \quad \text{Equação (10)}$$

onde, T_i são os valores calculados pelo modelo, M_i os valores experimentais, \bar{M} a média dos valores experimentais e N é o número de determinações.

Experimento (C): Calibração do sensor de umidade, consiste em aplicar diferentes lâminas de água correspondente a valores de umidade volumétrica específicos onde os períodos de saída (μs) correspondentes foram registrados para cada lâmina. A primeira leitura é feita com o solo seco, e posteriormente mais 9 leituras foram tomadas totalizando em 10 pontos de calibração. Os períodos de saída foram computados quando a lâmina de água infiltra, passando a não apresentar variações significativas nos períodos de saída (μs). O dispositivo experimental utilizado para as calibrações é o mesmo apresentado no Experimento B.

Resultados e discussão

A classificação textural, os valores das massas específicas dos solos (kg.m^{-3}), os teores (%) de areia, silte e argila, são apresentados na Tabela 1. O solo coletado no município de São João, Serra Talhada e no Recife foram caracterizados como tipo Franco Arenoso, Franco Argiloso e Franco, respetivamente. O solo de textura Franco Arenoso apresenta teores de areia superior a 80 %. No solo Franco, os teores de silte, areia e argila são mais equilibrados. O solo Franco argiloso, apresenta os maiores teores de argila e o menor teor de areia.

Tabela 1. Classificação textural, massa específica e os teores de areia, silte e argila dos solos estudados.

Solos	ρ_s (kg.m^{-3})	Teores (%)			Classe Textural
		Areia	Silte	Argila	
São João	1560	82.7	13.8	3.5	Franco Arenoso
Serra Talhada	1380	43.7	18.7	37.5	Franco Argiloso
Recife	1550	46.3	37.3	16.4	Franco

Determinação do Alcance do Sensor

Analisando o gráfico da Figura 4, é possível observar que o período de saída era 33.7 μs , paríoso referente ao nível de água rente ao guia de ondas. Com a elevação do nível de água, os períodos de saída aumentaram significativamente, principalmente entre os níveis de 9.5 a 12 cm. Entre 12 e 18 cm as variações são praticamente desprezíveis, ou seja, a derivada se comporta praticamente constante.

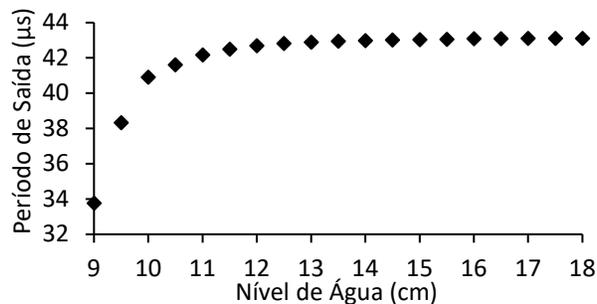


Figura 4. Período de saída em função da variação de níveis de água.

O experimento demonstra que até 3 cm acima do sensor, este registrou variação dos meios circundantes (Água + Ar). Acima deste valor o sensor apenas registra valores correspondentes a água. É possível identificar que a região mais sensível é em torno de 1 cm acima do sensor.

Simulação de Irrigação em Condições Controladas

Os resultados do *Experimento (A)* estão descritos abaixo e podem ser observados no gráfico da Figura 5. A massa específica e porosidade dos solos após a montagem para todos os experimentos foi de 1550 kg.m^{-3} e 41.35 % respectivamente.

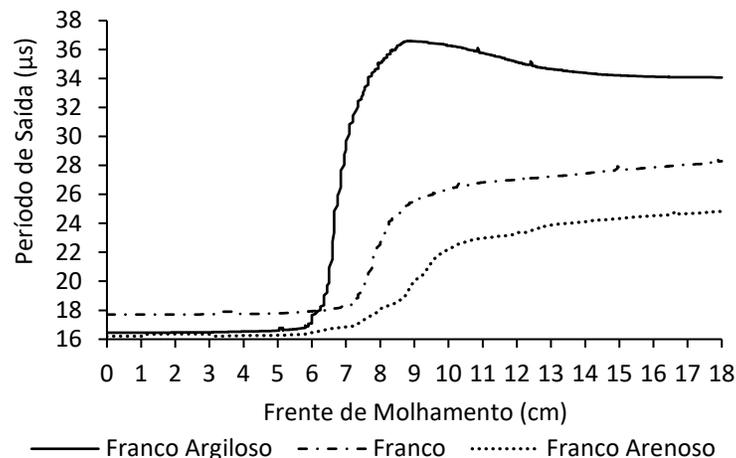


Figura 5. Avanço da frente de molhamento em função do tempo de resposta do sensor.

Mesmo com o fornecimento de água, os períodos de saída permanecem praticamente constantes para as três texturas, isso ocorre, devido à água não ter infiltrado até a considerada região de atuação do sensor, que por sua vez, está apenas preenchida com a fração sólida e gasosa do solo.

Um incremento dos períodos de saída ocorre com 6 cm de infiltração, pois a água invade a considerada região de atuação, preenchendo os poros do solo. Devido a atenuação dos pulsos elétricos ocorrerem cerca de 80 vezes maior na água que nos componentes sólidos e gasoso se explica o incremento dos valores.

Como o guia de ondas do sensor está a 9 cm de profundidade e com cerca de 6 cm que começaram os incrementos dos períodos de saída, essas variações ocorrem significativamente até 12 cm de infiltração e de 13 a 18 cm o comportamento dos períodos de saída ficam sem grandes variações. Pode se constatar que a região de atuação é de 3 cm acima e é a mesma abaixo do guia de ondas para as três classes texturais.

Os resultados do *Experimento (B)*, estão descritos abaixo e podem ser observados no gráfico da Figura 6.

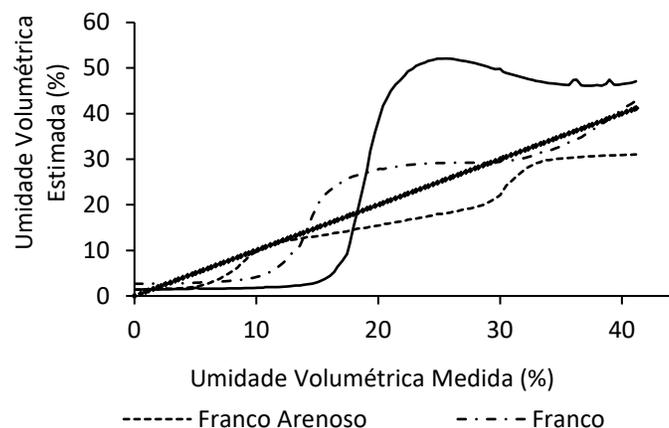


Figura 6. Experimento onde se avaliou desempenho da equação de quadrática para estimar Umidade Volumétrica (θ_v).

De forma geral, é possível observar que os valores estimados pela equação quadrática no início do experimento, onde o solo está seco são muito próximos de zero. No caso do solo Franco arenoso, no decorrer do experimento nota-se que os valores estimados subestimam os dados medidos em praticamente todo o experimento. Maiores desvios ocorrem com 30% de umidade e no final do experimento com o solo saturado. Já para o solo Franco os valores estimados subestimaram os dados medidos no trecho inicial, a seguir o comportamento inverte e no trecho final os valores estimados representaram bem os dados medidos. No caso do solo Franco Argiloso, de forma geral o comportamento dos valores estimados se diferenciaram bastante dos dados medidos. Os valores estimados subestimam os dados medidos desviando cerca de 15% de umidade e depois passam a superestimar os dados medidos alcançando uma diferença acentuada de até 30 % de umidade.

É importante destacar no caso do solo tipo franco argiloso, um pico de umidade se forma e depois decresce e estabiliza, representando uma perda nos valores de umidade. Essa discrepância não pode ser considerada normal, pois diferentemente do observado no gráfico da figura 6, o processo de saturação foi contínuo saindo do solo seco até alcançar a saturação, sem perdas. Essa variação pode ser atribuída a maiores teores de argila presentes no solo. De acordo com Villwock *et al.* (2004), algumas particularidades como: os altos teores de Ferro e Argila e a expansibilidade do solo, podem ocasionar alterações na resposta do sensor e calibrações são necessárias. Além disso, para equipamentos com frequência abaixo de 500 MHz, que é o caso do utilizado nessa pesquisa, a umidade pode ser superestimada devido a elevados valores de condutividade elétrica do solo, gerados principalmente pela solução do solo (Regalado *et al.*, 2005). O comportamento do modelo calculado difere bastante dos dados observado no experimento. Destacando a ineficiência do modelo para este tipo de solo. A fração argilosa devido a elevada superfície específica, aumenta a dispersão do sinal eletromagnético e a permissividade aparente do solo o que contribui para uma percepção incorreta do aumento da umidade pelo sensor (Robinson *et al.*, 2003).

É importante ressaltar que o desempenho inadequado da equação fornecida pelo fabricante do equipamento pode ser atribuído a uma série de peculiaridades existentes nos solos tropicais. Propriedades como elevados teores de argila, expansibilidade, teores de óxido de ferro, teores de sais e matéria orgânica influenciam no desempenho do sensor, uma vez que interferem na propagação do sinal eletromagnético emitido pelo guia de ondas.

Deste modo, esforços experimentais devem ainda serem feitos para considerar outras propriedades, além da constante dielétrica nas equações de calibrações. Foi realizada a análise estatística, entre os valores de umidade volumétrica encontrados experimentalmente e os valores estimados pela equação quadrática. Os parâmetros analisados foram o EQM, RD, EM, CRM e R^2 , os resultados da análise estatística são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado da análise estatística sobre a comparação entre os valores experimentais obtidos e os estimados pela equação quadrática.

Solo	EQM	RD	EM	CRM	R^2
Franco Arenoso	24.89	0.28	0.93	0.20	0.97
Franco	20.69	0.21	0.95	-0.047	0.89
Franco Argiloso	70.07	0.12	0.39	-0.33	0.76

Os menores valores de EQM, foram obtidos para os experimentos realizados com o solo franco (20.69 %) e franco arenoso (24.89 %). Demonstrando, que os valores do modelo teórico calculado, apresentam baixo grau de desvio em relação aos dados experimentais, para estes dois tipos de

solos. O valor de EQM para o solo franco argiloso, demonstra que o grau de desvio é alto dos dados calculados pelo modelo teórico, cerca de 71%. Valores de RD e EM mais próximo de 1 (um) foram obtidos apenas para os experimentos realizado com o solo franco e franco arenoso. Para o solo franco os valores de RD e EM são de 0.21 e 0.95. Para o solo tipo franco arenoso os valores de RD e EM foram de 0.28 e 0.93. Para o experimento com solo franco argiloso os valores de RD e EM não se mostram consistentes. Valores de CMR próximo de zero, foram obtidos apenas nos experimentos com solo franco arenoso (0.20) e com o solo franco (-0.04). O experimento realizado com solo franco argiloso (-0.33), apresentou o pior resultado. Observa se que o único solo em que o modelo calculado subestimou consideravelmente o medido, foi o tipo franco arenoso, devido ao valor de CMR positivo. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é modelo, melhor ele se ajusta à amostra, portanto, o experimento que apresentou o modelo com melhor ajuste foi o realizado com solo tipo franco arenoso, seguido do solo franco. O solo que apresentou o pior ajuste, foi o argiloso.

Globalmente, a equação quadrática é mais recomendada, para solos com características texturais arenosa e siltosa em comparação com o solo argiloso que apresentou os piores resultados estatísticos. Para o solo com alto teor de argila, como no caso do solo tipo franco argiloso abordado nesse estudo, o modelo teórico não apresentou bons resultados.

Os resultados para o *Experimento (C)* estão descritos a seguir. A partir da avaliação do desempenho da equação quadrática, observou-se que para os solos arenosos e siltosos, a equação quadrática apresenta um desempenho razoável, porém, para o solo com maior teor de argila a equação quadrática não apresentou bom desempenho, desviando bastante do dados medidos e apresentado pior delineamento estatístico. Portanto o sensor CS616 foi calibrado, com o objetivo de otimizar o seu desempenho quando utilizado nesses tipos de solos. O objetivo das calibrações é propor equações que relacionem o período de saída do sensor com a umidade volumétrica para as três classes de textura de solos. Os resultados dos experimentos de calibração do sensor de umidade CS616, podem ser observados na Figura 7 onde é observado o comportamento dos períodos de saída (μs) do sensor, em função da umidade volumétrica (%) aplicadas experimentalmente no solo.

Analisando os resultados das calibrações é possível destacar que o período de saída para os três solos secos é cerca de 16 μs . No caso do solo franco arenoso os períodos de saída variaram em média 1.32 μs entre os valores de umidade volumétrica aplicadas. No caso do solo franco, a variação nos períodos de saída (μs) em média para todo o experimento foi de 1.71 μs , se diferenciando do franco arenoso por apresentar uma variação mais brusca nos valores do período de saída do sensor. No caso do solo franco argiloso, as diferenças encontradas em relação ao demais solos é que no intervalo de 0.1 a 0.15 m^3/m^3 e 0.15 a 0.2 m^3/m^3 ocorrem as maiores variações dos períodos de saída de 9.86 e 4.36 μs respectivamente.

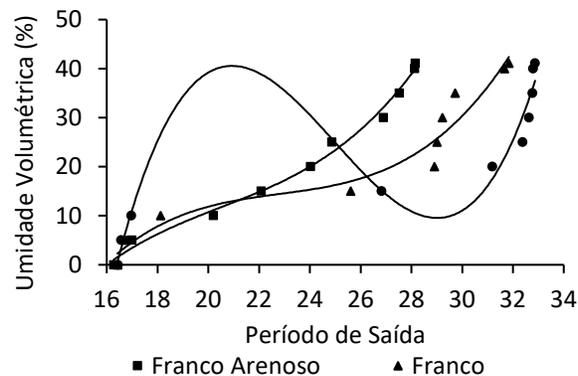


Figura 7. Pontos da calibração realizada com o solo franco arenoso, franco e franco argiloso

Coelho *et al.* (2006) ressaltam que os modelos de calibração variam conforme o tipo de solo e que um modelo polinomial de terceiro grau pode ser calibrado com exatidão para cada situação de solo. Foram realizados ajustes visando obter equações que relacionem o período de saída com a umidade volumétrica de maneira mais eficiente. Os dados experimentais foram ajustados para uma equação polinomial de 3º grau (Equação 11).

$$\theta_v = C0 + C1 \cdot t + C2 \cdot t^2 + C3 \cdot t^3 \quad \text{Equação (11)}$$

onde, θ_v é a umidade volumétrica (m^3/m^3) e t é o período de saída (μs), $C0$, $C1$, $C2$ e $C3$ são coeficientes empíricos da equação polinomial de terceiro grau.

Os parâmetros da equação polinomial de terceiro grau e seus respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2) indicando o grau de ajuste da equação, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes da equação polinomial de terceiro grau para os três tipos de solos.

Solo	C0	C1	C2	C3	R ²
franco arenoso	-2.7799	0.3834	-0.0177	0.0003	0.9919
franco	-3.5281	0.4691	-0.0203	0.0003	0.9505
franco argiloso	-16.663	2.1468	-0.0883	0.0012	0.9593

Os valores do coeficiente de determinação demonstram que o modelo polinomial de terceiro grau relaciona bem as variáveis para os três tipos de solos. O coeficiente de determinação (R^2) tende a 1 (um), quando o modelo é mais explicativo e melhor se ajusta a amostra, portanto valores próximos de 1 (um), foram obtidos para os três tipos de solos, R^2 de 0.99 para o solo tipo franco arenoso, 0.95 para o solo tipo franco e 0.95 para o solo tipo franco argiloso. O modelo polinomial

de terceiro grau se mostrou adequado em estudos como os de Medeiros *et al.* (2007) para um Latossolo Vermelho Distroférico, os de Milani *et al.* (2008) para um Latossolo Vermelho.

Conclusão

Este trabalho avaliou a performance de um sensor tipo TDR para três diferentes solos do estado de Pernambuco. A partir da realização dos experimentos foi possível concluir o seguinte:

- 1) O alcance do sensor de umidade tipo TDR CS616 da Campbell Sci é de aproximadamente de 3 cm acima e abaixo do sensor.
- 2) A equação quadrática fornecida pelo fabricante do sensor de umidade CS616, não apresentou um bom desempenho para os solos estudados. Para o solo franco arenoso o sensor subestimou os valores medidos em 20 %, para o solo franco superestimou os valores medidos em 4 %, já para o solo franco argiloso, a superestimação foi de 34 %;
- 3) A calibração realizada demonstra que um modelo de terceiro grau, apresenta bom ajuste entre os valores medidos e estimados, com valores de coeficiente de determinação superiores a 95%.

Agradecimentos

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Ensino Superior) pela concessão da bolsa de mestrado do primeiro autor e ao projeto "Observatório Nacional da Dinâmica de Água e Carbono no Bioma Caatinga ONDACBC (CNPq processo No. 465764/2014-2; FACEPE processo APQ-0498-3.07 / 17; CAPES processo No. 88887.136369/2017-00).

Referência bibliográficas

- Almeida, C. A. B., Antonino, A. C. D., Pimentel, R. M. M., Lira, C. A. B. O., Lima, J. R. S. (2012) Influência da densidade na estimativa da umidade volumétrica em um latossolo vermelho-amarelo. *Revista brasileira de geografia física*, **5**(5), 1056-1068. doi: 10.26848/rbgf.v5.5.p1056-1068
- Almeida, A. V. D. L., Correa, M. M., Lima, J. R. S.L., Souza, E. S., Santoro, K. R., Antonino, A. C. D. A. (2015) Atributos físicos, macro e micromorfológicos de Neossolos Regolíticos no agreste meridional de Pernambuco, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **39**(5),1235-1246. doi: 10.1590/01000683rbcs20140757
- Campbell Scientific inc CS616 and CS625 Water Content Reflectometers (2011) Logan Utah, U.S.A.
- Cichota, R., Jong, V. L. Q., (2004) Avaliação no campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo, *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*, **8**(1),72-78. doi: 10.1590/S1415-43662004000100011
- Coelho, E. F., Vellame, L. M., Coelho Filho, M. A., Ledo, C. A. S. (2006) Desempenho de modelos de calibração de guias de ondas acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **30**, 23-30. doi: 10.1590/S0100-06832006000100003
- Consoli, S., Licciardello, F., Vanella, D., Pasotti, L., Villani, G., Tomei, F. (2016) Testing the water balancing model criteria using TDR measurements micrometeorological data and satellite-based information, *Agricultural Water Management*, **170**, 68-80. doi: 10.1016/j.agwat.2015.11.003

- Corradini, C. (2014) Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales, *Journal of Hydrology*, **516**, 1-5. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.02.051
- Cristi, F., Fierro, V., Suárez, F., Muñoz, J.F., Hausner M.B. (2016) A tdr-waveform approach to estimate soil water content in electrically conductive soils, *Computers and Electronics in Agriculture*, **121**, 160-168. doi: 10.1016/j.compag.2015.12.004
- Kalita, H., Palaparthi, V. S., Baghini, M. S., Aslam, M. (2016) Graphene quantum dot soil moisture sensor, *Sensors and Actuators b:Chemical*, **233**, 582-590. doi: 10.1016/j.snb.2016.04.131
- Laloy, E., Huisman, A. J., Jacques, D. (2014) High-resolution moisture profiles from full-waveform probabilistic inversion of tdr signals, *Journal of Hydrology*, **519**, 2121-2135. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.005
- Lekshmi, S. U., Singh, D. N., Shojaei Baghini, M. (2014) A critical review of soil moisture measurement, *Measurement*, **54**, 92-105. doi: 10.1016/j.measurement.2014.04.007
- Manieri, J. M., Vaz, C. M. P., de Maria, I. C. (2007) Sonda espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo, *Revista Brasileira Ciência do Solo*, **31**, 191-198. doi: 10.1590/S0100-06832007000200001
- Medeiros, J. D. F., Castro, N., Goldefum, J. A., Clarke, R. T. (2007) Calibração de sondas do TDR em um latossolo. *Revista brasileira de recursos hídricos*, **12**(2), 19-25. doi: 10.21168/rbrh.v12n2.p19-25
- Milani, D. I. C., Tavares, M. H. F., Scherpinsk, C. (2008) Calibração de sonda TDR em condições de laboratório, *Revista Ambiente & Água*, **3**(1), 68-75. doi: 10.4136/ambi-agua.43
- Nasta, P., Penna, D., Brocca, L., Zuecco, G., Romano, N. (2018) Downscaling near-surface soil moisture from field to plot scale: A comparative analysis under different environmental conditions, *Journal of Hydrology*, **557**, 97-108. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.12.017
- Ponciano, I. M., Miranda, J. H., Cooke, R. A., Grah, V. F., Silva, A. J. P. (2016) Metrological assessment of TDR performance for measurement of potassium concentration in soil solution, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **20**(4), 343-349. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n4p343-349
- Regalado, C. M., Muñoz-Carpena, R., Socorro, A. R., Hernández-Moreno, J. M. (2003) Time domain reflectometry models as a tool to understand the dielectric response of volcanic soils, *Geoderma*, **117**, 313-330. doi: 10.1016/S0016-7061(03)00131-9
- Robinson, D. A., Jones, B. S., Wraith, J. M., Or D., Friedman, S. P. A. (2003) Review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry, *Vadose Zone Journal*, **2**, 444-475. doi: 10.2113/2.4.444
- Romano, N. (2014) Soil moisture at local scale: measurements and simulations, *Journal of Hydrology*, **516**, 6-20. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.026
- Santos, H. G., Jaacomine, P. K. T., Anjos, L. H., Oliveira, V. A., Oliveira, J. B., Coelho, M. R., Lumberras, J. F., Cunha, T. J. F. (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos 3. Ed. Rev. Ampl. Brasília, df., 353 pp.
- Santos Neto, S. M. (2015) Avaliação da dinâmica da água na resposta de sensor tipo TDR em solos de Pernambuco. 97 pp. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Energéticas e Nucleares), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/16243>
- Tommaselli, J. T. G., Bacchi, O. O. S. (2001) Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **36**(9), 1145-1154. doi: 10.1590/S0100-204X2001000900008
- Topp, G. C., Davis, J. L., Annan, A. P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, **16**(3), 574-582. doi: 10.1029/WR016i003p00574
- Uniyal, B., Dietrich, J., Vasilakos, C., Tzoraki, O. (2017) Evaluation of SWAT simulated soil moisture at catchment scale by field measurements and Landsat derived indices. *Agricultural Water Management*, **193**, 55-70. doi: 10.1016/j.agwat.2017.08.002
- Villwock, R., Tavares, M. H. F., Vilas Boas, M.A. (2004) Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. *Irriga*, **9**(1), 82-88. doi: 10.15809/irriga.2004v09n1p82-88
- Zanetti, S. S., Cecílio, R. A., Silva, V. H., Alves, E. G. (2015) General calibration of TDR to assess the moisture of tropical soils using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, **530**, 657-666. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.10.037