

CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE NO LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA *TIME DOMAIN REFLECTOMETRY* NA AMAZÔNIA

Vandeilson Belfort Moura¹, Denis de Pinho Sousa², Hildo Giuseppe Garcia Caldas Nunes³, Deborah Luciany Pires Costa⁴, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza⁵

RESUMO

A calibração de sensores com *Time Domain Reflectometry* (TDR) em solos amazônicos é inexistente, sendo necessária para minimizar erros na estimativa da umidade volumétrica no solo (θ) pela constante dielétrica aparente do solo (K_a) em sistemas de irrigação. Assim, objetivou-se determinar e avaliar modelos de calibração de estimativa da θ em um Latossolo Amarelo Distrófico de Castanhal (PA) pela TDR. Foram correlacionados e ajustados valores de θ obtidos pelo método gravimétrico em função da K_a e da θ , ambos fornecidos por 4 sensores CS616 da Campbell Scientific. Seis modelos de calibração foram determinados, sendo 2 lineares e 4 polinomiais cúbicos. Os modelos de calibração apresentaram ótimo desempenho e alta exatidão pelos coeficientes de correlação e confiança, índice de concordância de Willmott, eficiência do modelo e raiz do erro quadrático médio. Houve diferença significativa entre a θ estimada pelos sensores, o gravimétrico e os seis modelos de calibração, sendo os modelos de calibração linear e polinomial cúbico recomendados para estimar a θ em Latossolo Amarelo distrófico, assim como a equação linear proposta pela fabricante do sensor que não apresentou diferença significativa pelo teste de Kruskal-Wallis com os seis modelos de calibração. Os modelos de Topp, Ledieu, Roth, Malicki e Tommaselli e Bacchi superestimaram os valores de θ e promoveriam déficit de água no solo e a subestimativa das equações linear e quadrática da fabricante indicariam um aumento da lâmina de água e do funcionamento do sistema de irrigação com uso irracional da água não sendo adequados para estimar a θ .

Palavras-chave: Gravimetria, água no solo, agricultura de precisão, constante dielétrica aparente.

¹ Mestre em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará. Fiscal Estadual Agropecuário, Agência de Defesa Agropecuária do Pará, Monte Alegre, Pará. E-mail: vandeilsonbelfort@hotmail.com

² Doutor em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará. E-mail: denisdepinho@agronomo.eng.br

³ Museu Paraense Emilio Goeldi – MPEG, Bolsista do Programa de Capacitação Institucional, Belém, Pará. E-mail: garibalde13@gmail.com

⁴ Doutoranda em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará. E-mail: deborahpires.agro@gmail.com

⁵ Orientador - Professor Dr. em Agrometeorologia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará. E-mail: paulojorge_oliveira@globomail.com

CALIBRATION AND ESTIMATION OF MOISTURE IN DISTRICT YELLOW LATOSOL BY TIME DOMAIN REFLECTOMETRY IN AMAZON

ABSTRACT

The calibration of sensors with Time Domain Reflectometry (TDR) in Amazonian soils is non-existent, being necessary to minimize errors in the estimation of the volumetric moisture in the soil (θ) by the apparent dielectric constant of the soil (K_a) in irrigation systems. Thus, the objective was to determine and evaluate calibration models for estimation of θ in an Dystrophic Yellow Latosol of Castanhal (PA) by TDR. The values obtained by the gravimetric method were correlated and adjusted as a function of K_a and θ , both supplied by 4 Campbell Scientific CS616 sensors. Six calibration models were determined, 2 linear and 4 cubic polynomials. The calibration models showed excellent performance and high accuracy by the correlation and confidence coefficients, Willmott's agreement index, model efficiency and root of the mean square error. There was a significant difference between the θ estimated by the sensors, the gravimetric and the six calibration models, with the linear and cubic polynomial calibration models being recommended to estimate the θ in Yellow Dystrophic Latosol, as well as the linear equation proposed by the sensor manufacturer that does not showed a significant difference by the Kruskal-Wallis test with the six calibration models. The Topp, Ledieu, Roth, Malicki and Tommaselli and Bacchi models overestimated the values of θ and would promote water deficit in the soil, and the underestimation of the manufacturer's linear and quadratic equations would indicate an increase in the water depth and the functioning of the irrigation system with irrational use of water not being adequate to estimate θ .

Key words: Gravimetry, water in the soil, precision agriculture, apparent dielectric constant.

INTRODUÇÃO

A região amazônica apresenta condições ambientais adversas de deficiência de água e temperaturas do ar elevadas, onde o plantio de várias culturas se restringe ao primeiro semestre do ano (período mais chuvoso) (FARIAS et al., 2017).

O Pará possui cerca de 29.333 ha de área irrigada, sendo que em 41% destas áreas são utilizados métodos de irrigação não tradicionais (SOUZA et al., 2012). Esses dados reforçam a necessidade de informações e tecnologias para promover o uso racional dos recursos hídricos, a fim de, suprir a demanda hídrica das culturas.

A técnica TDR monitora a θ e sua variação em um volume de solo em tempo real e permite o planejamento, o dimensionamento e o gerenciamento do manejo dos sistemas de irrigação, na oferta da quantidade adequada de água para a planta (FARIAS et al., 2017). Vale ressaltar que não se conhece o comportamento da TDR nas condições edafoclimáticas da região amazônica.

O princípio da TDR é baseado na constante dielétrica aparente do solo (K_a), cujo valor da água (80) superior ao da matriz seca do solo (3) e do ar (1) permite maior polarização entre a molécula da água e o elétron, medindo-se o tempo de trânsito do pulso eletromagnético através de guias de ondas eletromagnéticas no solo (SOUZA et al., 2016).

Com a finalidade agrometeorológica na agricultura de precisão, tem-se utilizado em estações meteorológicas automáticas sensores com a técnica da TDR, objetivando estimar a θ a partir da K_a , partindo-se do pressuposto que por meio dessa técnica pode-se observar a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera pela quantificação do balanço hídrico no solo (SANTANA et al., 2012), o que permite quantificar o conteúdo de água no solo através de modelos empíricos e semi-empíricos/físicos sem a necessidade de proceder análises laboratoriais pelo método gravimétrico com informações automáticas em tempo real.

CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE NO LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA TIME DOMAIN REFLECTOMETRY NA AMAZÔNIA

Entretanto, modelos empíricos de calibração do sensor TDR, tais como os considerados universais, propostos por Topp et al. (1980) que correlaciona a K_a e θ caracterizam-se por dispensarem qualquer tipo de calibração local, visando a sua utilização. Tais modelos acabam sendo criticados pela literatura especializada, pois, baseiam-se apenas nas relações funcionais e de dependência existentes entre a K_a e θ , assim como os modelos de Ledieu et al. (1986), Tommaselli e Bacchi (2001), bem como os recomendados pela fabricante do sensor TDR *Campbell Scientific*.

Esses modelos intitulados universais ao desconsiderarem variáveis físicas e químicas dos locais dos solos nos quais serão instalados e utilizados, acabam por alterar os valores estimados de θ , pois os conteúdos de matéria orgânica, a textura, bem como os atributos químicos que lhe são peculiares, tais como aqueles que são inerentes aos Latossolos caracterizados por deterem altos teores de óxido de ferro acabam constituindo fontes de erros na estimativa de θ a partir do sensor TDR (GUIMARÃES et al., 2019).

Por outro lado, modelos físicos/semi-empíricos de Roth et al. (1990) e Malicki et al. (1996) que consideram a densidade aparente e porosidade do solo, respectivamente, conferem robustez na parametrização do modelo, porém podem promover erros na estimativa da θ , por desconsiderarem os demais atributos físico-químicos dos solos que interferem nessas estimativas (GONÇALVES et al., 2011).

Deste modo, o uso de modelos não calibrados pode subestimar ou superestimar a θ , sendo necessário a calibração local com modelos específicos. Todavia, essa é uma das principais dificuldades encontradas pelos pesquisadores e produtores irrigantes, devido à ausência de um método padrão de calibração, o que associado ao significativo custo de aquisição dos sensores, acabam por tornar essa promissora técnica como pouco utilizada em estações

experimentais produtivas (ALMEIDA et al., 2012; LIMA et al., 2018).

Portanto, objetivou-se neste trabalho determinar e avaliar modelos de calibração de estimativa da umidade volumétrica de água em um Latossolo Amarelo Distrófico do Nordeste paraense pela *Time Domain Reflectometry*.

MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental e características do solo

A pesquisa ocorreu no período de 07/08/2017 a 24/05/2018 compreendendo a coleta e análise do solo, testes iniciais e medição da θ . O solo utilizado foi coletado na Fazenda Escola da UFRA no município de Castanhal, Pará (1°19'24.48" S, 47°57'38.20" W, 41 m) e foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (SANTOS et al., 2013).

O município apresenta clima do tipo "Am" de acordo com a classificação de Koppen, com temperatura média anual de 26 °C, umidades relativas médias anuais máxima e mínima de 95% e 79%, respectivamente, com precipitação média anual de 2.571,6 mm (SOUZA et al., 2017).

Para realizar a calibração dos sensores TDR, amostras indeformadas foram coletadas em quatro cilindros que possuíam 0,30 m de altura e 0,10 m de diâmetro, inseridos no solo até o preenchimento de sua superfície sendo retirados de forma a não promover alterações físicas na estrutura do solo.

Foram coletadas amostras indeformadas com anéis volumétricos de 10 cm com quatro repetições para cada profundidade para determinação da densidade do solo, capacidade de campo e ponto de murcha permanente na câmara de pressão de Richards, e amostras deformadas com trado do tipo Holândes para fins de realização de análises físicas e químicas, ambas realizadas no laboratório da EMBRAPA Amazônia Oriental que classificou texturalmente o solo como franco-arenoso (Tabela 1).

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas do Latossolo Amarelo Distrófico utilizado na calibração dos quatro sensores CS616, 2018.

Prof. (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	θ_{cc} ($m^3 m^{-3}$)	θ_{pmp} ($m^3 m^{-3}$)	Ds ($g cm^{-3}$)	η ($m^3 m^{-3}$)	MO ($g kg^{-1}$)	Fe ($g kg^{-1}$)
0-0,2	72,8	13,2	14	0,21	0,12	1,56	0,53	15,72	0,4
0,2-0,4	68,6	13,4	18	0,24	0,14	1,71	0,52	7,29	0,3

Fonte: Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental. Granulometria - (método da pipeta); θ_{cc} - capacidade de campo e θ_{pmp} - ponto de murcha (extrator de Richards); Ds - densidade do solo (anel volumétrico); η - porosidade total; MO - matéria orgânica (dicromato); Fe: - ferro (extração com solução Mehlich¹).

Calibração pelo método gravimétrico

Os testes foram realizados no Laboratório de Agrometeorologia da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), em Belém, Pará. Inicialmente, as massas dos cilindros contendo o solo foram determinadas por uma balança eletrônica com 0,001g de precisão. Após a coleta em campo, as amostras tiveram a face inferior envolvida por um tecido preso por uma liga elástica, evitando perda de solo. No laboratório, os solos contidos nos cilindros foram saturados durante 48 h e, em seguida, dispostos sobre um estrado até que não houvesse drenagem.

Estas amostras de solo foram utilizadas na avaliação de quatro reflectômetros do conteúdo de água CS616 (Campbell Scientific Inc., Utah, USA-CSI). Estes, compostos de um dispositivo elétrico ligado por cabos a duas hastes de aço inoxidável com 0,30 m de comprimento, 0,0032 m de diâmetro com espaçamento de 0,032 m.

Os sensores foram conectados a um *data logger* CR1000 (Campbell Scientific. Inc., Logan, Utah, USA-CSI) que recebeu energia de uma bateria de 12 V alimentada por uma placa solar de 25 V. A programação inserida no *data logger* realizou leituras da Ka e θ das amostras a cada 10 segundos e armazenou as médias a cada 10 minutos.

A frequência de pulsação das hastes é de aproximadamente 70 MHz, sendo reduzida nos estágios de saída do circuito dos sensores para a frequência medida pelo *data logger*. A frequência de saída está empiricamente relacionada ao teor de água que através das equações Linear (Equação 1) e Quadrática (Equação 2) do sensor com precisão de 0,1% recomendadas pela fabricante estimam a θ a partir da Ka que é medida pelo CS616.

$$\theta = -0,4677 + 0,0283 * Ka \quad (1)$$

$$\theta = -0,0663 - 0,0063 * Ka + 0,0007 * Ka^2 \quad (2)$$

Cada sensor CS616 foi inserido no sentido vertical no cilindro com amostra de solo. A massa de cada cilindro foi obtida com e sem os sensores que permaneceram em contato com as amostras de solo até o final do experimento, sendo tomadas diariamente a umidade pelo método gravimétrico na temperatura média do ar de 27 °C e umidade relativa média de 78% em cada cilindro, estes foram mantidos com a superfície do solo exposta para que houvesse perda de água por evaporação.

Após a última pesagem e leitura da Ka e θ pela não variação da massa das amostras, foi determinada a massa do solo seca pelo método-padrão da estufa (até a massa constante a 105 °C). A partir das massas de solo seco, úmido e da densidade do solo foram obtidos os valores de umidade volumétrica pelo método gravimétrico (θ_g) de acordo com a equação 3.

$$\theta_g = \frac{(PU) - (PS)}{(PS)} * \frac{Ds}{Da} \quad (3)$$

onde:

θ_g - umidade volumétrica de água no solo, $cm^3 cm^{-3}$;

PU - massa do solo úmido - PR, g;

PS - massa do solo seco - PR, g;

PR - massa do cilindro, sensores e envoltórios (elástico + tecido), g;

Ds - densidade do solo, $g cm^{-3}$;

Da - densidade da água, $g cm^{-3}$.

A partir dos valores medidos de θ_g foi realizada análise de regressão no software R utilizando modelos lineares, quadráticos, cúbicos e exponenciais para as quatro repetições individualmente e para todos os

**CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE NO LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA
TIME DOMAIN REFLECTOMETRY NA AMAZÔNIA**

pontos coletados nas quatro amostras pela relação entre a θ_g e a K_a e entre a θ_g e a θ estimada pelas equações Linear (Equação 1) e Quadrática (Equação 2) recomendadas pela *Campbell Scientific Inc.* (CSI), sendo a θ_g a variável independente (y), K_a e θ a variável dependente (x), obtendo-se no final, três modelos de calibração individual na amostra que apresentou melhor desempenho e três modelos a partir de todos os pontos coletados nas quatro amostras de solo.

Avaliação dos modelos

As avaliações das estimativas da θ dos modelos foi realizada comparando-os com a θ_g , utilizando os seguintes parâmetros estatísticos de precisão: coeficiente de correlação (r) (Equação 4) e exatidão: coeficiente de confiança (c) (Equação 5), índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT et al., 1985) (Equação 6), eficiência do modelo (EF) (Equação 7) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 8) expressos de 0 a 100%.

$$r = \frac{\sum (O - \bar{O})(P - \bar{P})}{\sqrt{(\sum (O - \bar{O})^2)(\sum (P - \bar{P})^2)}} \quad (4)$$

$$c = r \cdot d \quad (5)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P - O)^2}{\sum_{i=1}^N [(|P\bar{O}|) + (|O - \bar{O}|)]^2} \quad (6)$$

$$\theta = -5,3 \cdot 10^2 + 2,92 \cdot 10^2 \cdot K_a + 5,5 \cdot 10^4 \cdot K_a^2 + 4,3 \cdot 10^6 \cdot K_a^3 \quad (9)$$

$$\theta = 0,1138 \cdot \sqrt{K_a} - 0,1756 \quad (10)$$

$$\theta = \frac{\sqrt{K_a} - (2 - \eta)}{8} \quad (11)$$

$$\theta = (\sqrt{K_a} - 0,819 - 0,168 \cdot D_s - 0,159 \cdot D_s^2) / (7,17 + 1,18 \cdot D_s) \quad (12)$$

$$\theta = 1,1^{-5} \cdot K_a^3 - 0,0007 \cdot K_a^2 + 0,0257 \cdot K_a - 0,0202 \quad (13)$$

onde:

η - corresponde à porosidade do solo, $m^3 m^{-3}$;
 K_a - constante dielétrica aparente do solo, adimensional.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P - \bar{P})^2}{\sum_{i=1}^N (P - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P - O)^2}{N}} * \frac{100}{\bar{O}} \quad (8)$$

onde:

O - valores de umidade volumétrica pelo método gravimétrico, $cm^3 cm^{-3}$;

\bar{O} - média dos valores de umidade volumétrica pelo método gravimétrico, $cm^3 cm^{-3}$;

P - valores estimados, $cm^3 cm^{-3}$;

\bar{P} - média dos valores estimados, $cm^3 cm^{-3}$;

N - número de leituras.

O desempenho dos modelos foi avaliado pelo coeficiente de confiança (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). A classificação da exatidão dos modelos foi realizada conforme o percentual do RMSE (JAMIESON et al., 1991) e os demais pela magnitude expressa.

Os modelos que apresentaram os melhores desempenhos nas estimativas da θ obtidos pela relação entre a θ_g em função da K_a na calibração para o solo em estudo, foram comparados com a θ estimada por modelos de calibração referência na literatura obtidos com TDR em várias classes de solo de Topp et al. (1980) (9), Ledieu et al. (1986) (10), Roth et al. (1990) (11), Malicki et al. (1996) (12) e Tommaselli e Bacchi (2001) (13).

Avaliou-se a θ estimada pelos modelos que obtiveram os melhores desempenhos na calibração em cada amostra e com todos os

pontos medidos nas quatro repetições, a θ estimada pelo sensor CS616 com as equações Linear e Quadrática, a θ estimada pelos modelos de calibração da literatura com a θ_g através do teste de Kruskal-Wallis para comparação dos valores entre os grupos em amostras independentes, a um nível de significância de 5% de probabilidade, através do software R.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, observa-se os seis modelos que apresentaram os melhores parâmetros estatísticos na calibração, por meio dos ajustes realizados a partir dos valores de θ_g medidos no intervalo de 0,16 a 0,38 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ correlacionados com a K_a e as equações recomendadas pelo fabricante.

Pela relação entre a θ_g e a K_a foram obtidas duas equações que apresentaram os

melhores desempenhos na estimativa da θ com ajustes lineares (Figura 1A e 1D), sendo elas a equação denominada de Calibração 1 ($\theta = 0,0428Ka - 0,8149$), estabelecida com as medidas de uma das quatro repetições das amostras de solo e a equação Geral 1 ($\theta = 0,0388Ka - 0,7182$) obtida com todas as medidas/observações nas quatro repetições.

Já pela relação entre a θ_g e a θ estimada pelas duas equações da fabricante foram obtidos quatro modelos com ajustes polinomiais cúbicos. Dois modelos com a equação Linear do sensor ($\theta = 82,319\theta^3 - 61,005\theta^2 + 16,328\theta - 1,2862$) e ($\theta = 107,82\theta^3 - 81,09\theta^2 + 21,363\theta - 1,6929$), denominadas de Calibração 2 e Geral 2 (Figura 1B, 1E), e dois modelos com a equação Quadrática do sensor ($\theta = 72,309\theta^3 - 49,782\theta^2 + 12,65\theta - 0,879$) e ($\theta = 93,323\theta^3 - 64,803\theta^2 + 16,005\theta - 1,1176$) chamadas de Calibração 3 e Geral 3, respectivamente (Figura 1C, 1F).

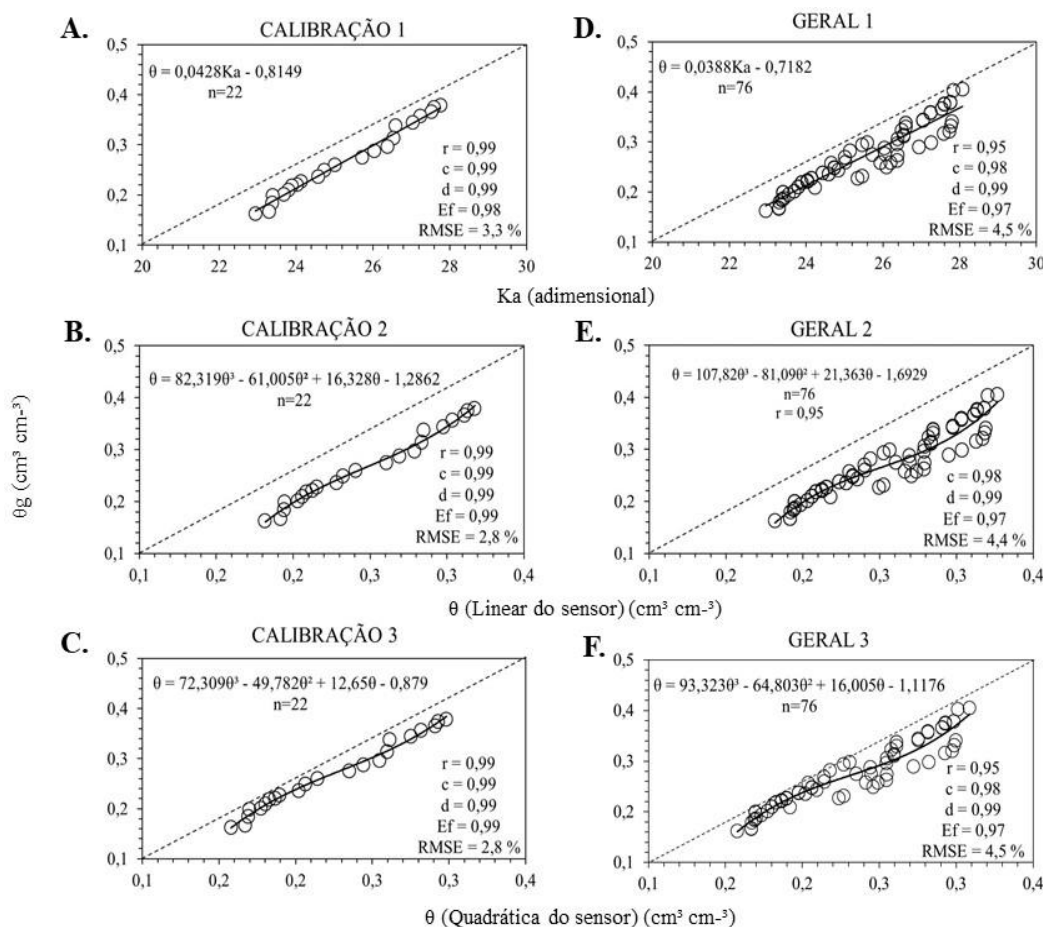


Figura 1. Calibrações entre a θ_g em função da K_a (1A, 1D), θ_g e equação linear do sensor (1B, 1E), θ_g e equação quadrática do sensor (1C, 1F) e avaliação dos modelos pelos critérios estatísticos no Latossolo Amarelo Distrófico, Castanhal, PA.

CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE NO LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA TIME DOMAIN REFLECTOMETRY NA AMAZÔNIA

Os seis modelos de calibração avaliados na estimativa da θ obtiveram ótimos desempenhos decorrentes dos elevados valores dos parâmetros estatísticos avaliados, simulando com exatidão os valores

obtidos por gravimetria e corrigindo os valores estimados pelo sensor CS616, onde ambos mantiveram padrão semelhante ao gravimétrico (Figura 2).

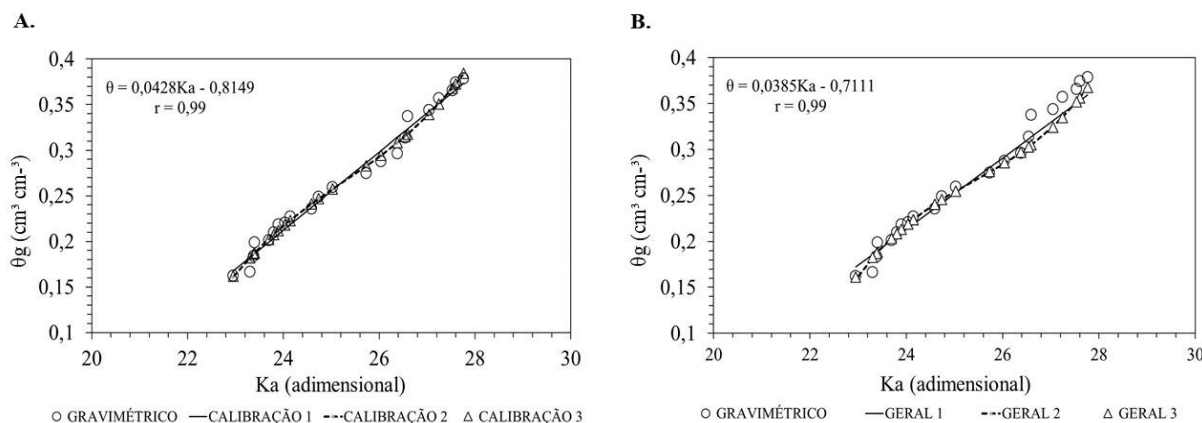


Figura 2. Comportamento do conteúdo de água no solo estimada pelos três melhores modelos de calibração obtidos com amostras individuais (A) e com todos os pontos das quatro amostras de solo (B) do experimento de calibração dos sensores CS616, 2018.

Ótimos ajustes polinomiais cúbicos nos modelos de calibração (Figura 1B, 1C, 1E e 1F) decorreram da flexibilidade dos parâmetros, realizado a partir dos dados observados, corroborando a alta precisão e exatidão obtida por Topp et al. (1980) em diferentes classes de solos e Coelho et al. (2006) na calibração de sensores em Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho e Neossolo Fúlvico na estimativa de θ .

Entretanto, os ajustes lineares exibiram

melhores desempenhos, quando comparados ao polinomial cúbico, na correlação entre a umidade gravimétrica e Ka (Figura 1A, 1D), situação observada por Santos et al. (2010) no Latossolo Vermelho e Guimarães et al. (2019) em um Latossolo Vermelho Distroférico. Entretanto, não verificou-se diferença significativa ($P>0,05$) entre a θ_g , os modelos de calibração 1, 2 e 3, bem como entre os modelos gerais e a equação Linear do sensor pelo teste de Kruskal-Wallis (Tabela 2).

Tabela 2. Estatística descritiva dos valores médio, desvio padrão, máximo, mínimo e o agrupamento da umidade volumétrica de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) pelo teste de Kruskal-Wallis estimado por todos os modelos.

Modelo	Média/DP	Máximo	Mínimo
Roth et al. (1990)	0,44±0,02 a*	0,47	0,41
Topp et al. (1980)	0,40±0,02 b	0,43	0,38
Ledieu et al. (1986)	0,40±0,02 b	0,42	0,37
Malicki et al. (1996)	0,39±0,02 b	0,42	0,37
Tommaselli e Bacchi (2001)	0,36±0,02 c	0,39	0,33
Calibração 1	0,27±0,07 d	0,37	0,17
Calibração 2	0,27±0,07 d	0,38	0,16
Calibração 3	0,27±0,07 d	0,38	0,16
Geral 1	0,26±0,06 d	0,36	0,17
Geral 2	0,26±0,06 d	0,37	0,16
Geral 3	0,26±0,06 d	0,37	0,16
Gravimétrico	0,27±0,07 d	0,38	0,16
Linear do Sensor	0,25±0,05 d	0,32	0,18
Quadrática do Sensor	0,22±0,05 de	0,30	0,16

*Médias do grupo seguidas por letras distintas, na coluna, diferem pelo Teste de Kruskal-Wallis ($P<0,05$).

Porém, constatou-se que a estimativa de θ por meio da equação quadrática do sensor (polinomial quadrático) apresentou diferença significativa quando comparada à obtida pelo gravimétrico e as equações de calibração, por estimarem a θ em uma condição de maior dispersão dos dados, simulando com menor precisão e exatidão os valores do conteúdo de água no solo pela TDR (Tabela 3).

Observou-se, após todos os ajustes para a obtenção do melhor modelo de estimativa de θ , que o ajuste polinomial quadrático obteve desempenho superior ao exponencial realizado a partir da regressão, porém ambos foram inferiores aos ajustes linear e polinomial cúbico.

Tabela 3. Avaliação dos modelos de estimativa da umidade volumétrica de água com TDR citados na literatura e recomendados pelo fabricante CSI com uso de amostras de solo com estrutura deformada e indeformada, a partir do coeficiente de correlação (r), índice de confiança (c), índice de concordância (d) e raiz do erro quadrático médio (RMSE).

Modelo	R	C	d	RMSE (%)	Classificação
Linear do Sensor	0,99	0,92	0,92	11,84	Ótimo
Quadrática do Sensor	0,99	0,83	0,84	18,61	Muito Bom
Tommaselli e Bacchi (2001)	0,99	0,55	0,55	39,89	Mediano
Malicki et al. (1996)	0,99	0,48	0,49	51,78	Sufrível
Ledieu et al. (1986)	0,99	0,48	0,49	52,24	Sufrível
Topp et al. (1980)	0,99	0,46	0,47	54,83	Sufrível
Roth et al. (1990)	0,99	0,41	0,42	69,18	Mau

Verificou-se subestimativa dos valores da K_a em valores de θ para o Latossolo Amarelo Distrófico em 72,7% pela equação linear e 90,9% pela quadrática, onde os valores máximos e médios são menores quando comparados com os obtidos pelo método gravimétrico e as estimativas obtidas com os modelos de calibração deste trabalho (Figura 3).

Tal resultado pode ser atribuído a granulometria, bem como a macroporosidade predominante na estrutura do solo estudado, a maior permeabilidade, a menor área superficial específica das partículas de areia e a elevada capacidade de adsorção da água higroscópica pelas partículas de silte e de argila.

Esse ambiente faz com que o elétron emitido pelo sensor não realize a polarização com a água e a medição da K_a e,

consequentemente, a estimativa de θ , seja inferior ao quantitativo efetivamente de água disponível no solo, ocorrendo o efeito de subestimativa que pode ser atribuída também a presença da matéria orgânica e ao elevado teor de óxido de ferro presente no Latossolo (Tabela 1) que interagem adsorvendo a água no solo e não permite a interação entre a molécula de água e o elétron emitido pelo sensor (GUIMARÃES et al., 2019).

A subestimativa promove o aumento na lâmina de água aplicada por sistemas de irrigação em áreas de cultivos agrícolas que monitoram a variação de θ com TDR, onde a aplicação excessiva de água promove a redução da oxigenação nas raízes e na absorção de nutrientes, o aumento da lixiviação dos sais no solo e dos custos com energia elétrica (BASSEGIO et al., 2012; DUTRA et al., 2012; WANG et al., 2013).

CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE NO LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA
TIME DOMAIN REFLECTOMETRY NA AMAZÔNIA

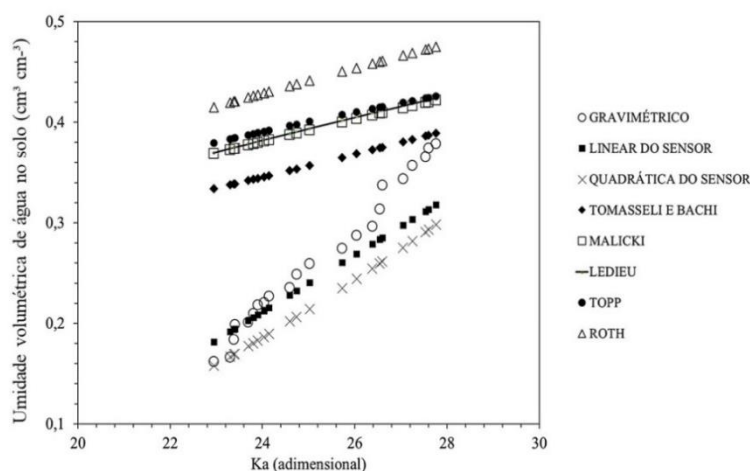


Figura 3. Comportamento da umidade volumétrica de água no solo (θ) entre 0,16 a 0,38 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ dos modelos de calibração da literatura e da CSI pela relação entre a θ em função da constante dielétrica aparente do solo (K_a) para Latossolo Amarelo Distrófico.

Subestimativas pelas equações da CSI do CS616 foram observadas por Lima et al. (2018) no Argissolo Amarelo e Cambissolo Háplico e Francesca et al. (2010). Almeida et al. (2012) verificaram que o solo com densidade menor, apresentou menor valor de θ para o mesmo valor da K_a , quando comparados com um solo de maior densidade aparente, o que justifica o comportamento observado de subestimativa no Latossolo Amarelo Distrófico de Castanhal que possui menor densidade aparente e textura franco-arenosa.

De acordo com Carvalho et al. (2015), os modelos recomendados pela CSI para alguns tipos de solos não são adequados para a estimativa com exatidão de θ , pois a K_a não é dependente e sensível apenas ao teor de água no solo mas, ao tipo de solo, densidade, temperatura do solo e do teor de sal solúvel, por isso o fabricante recomenda a calibração *in loco* do sensor.

Para o Latossolo estudado, observou-se que os valores de θ_g dos seis modelos obtidos na calibração e os estimados pelas equações Linear e Quadrática do sensor apresentaram menor dispersão nos valores de umidade inferiores a 0,22 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ e 0,19 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente, com melhor concordância no comportamento das curvas (Figura 3).

A maior correlação com menores conteúdos de água no solo, provocando

menores variações entre os valores estimados em solos minerais pela TDR, também foi observado por Serrarens et al. (2000) e Tommaselli e Bacchi (2001), sendo nessa faixa de umidade o encontro de parte significativa dos valores de capacidade de campo e do ponto de murcha permanente dos solos utilizados na agricultura irrigada, o que diminui o erro e permite melhor gerenciamento sobre o monitoramento da água no solo nos agroecossistemas.

Para valores de umidade acima de 0,23 e 0,20 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ estimados pela linear e quadrática do sensor, respectivamente, mostraram haver aumento de subestimativas de θ , fato também observado por Serrarens et al. (2000), Tommaselli e Bacchi (2001) e Roth et al. (1990) ao reportarem que elevados valores de θ podem alterar substancialmente as estimativas desse atributo com a TDR, tornando as equações da CSI inadequadas para essa situação.

Mesmo que a equação linear do sensor não tenha apresentado diferença significativa quando comparada ao método gravimétrico, por também ter sido desenvolvida em solos com teor de argila abaixo de 300 g kg^{-1} , os seus parâmetros de avaliação apresentaram menores índices quando comparado com os modelos obtidos na calibração (Tabela 3), além de promover superestimativas

em valores de umidade abaixo de $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 3).

Verificou-se ainda que os modelos de calibração da literatura de Tommaselli e Bacchi (2001), Malicki et al. (1996), Ledieu et al. (1986), Topp et al. (1980) e Roth et al. (1990) diferiram estatisticamente ($P < 0,05$) dos demais modelos (Tabela 2) e superestimaram a θ (Figura 3), situação observada por Santos et al. (2010) para os modelos de Ledieu et al. (1986) e Topp et al. (1980) em um Latossolo Vermelho.

Esses resultados explicam o baixo desempenho desses modelos indicado pelos parâmetros estatísticos avaliados (Tabela 3), isso devendo-se possivelmente as diferentes classes de solos na maioria de textura argilosa a muito argilosa usados para a obtenção dos modelos de calibração e pela localização geográfica, uma vez que, Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) calibraram modelos empíricos para solos do Canadá e Holanda, respectivamente.

Observou-se uma menor dispersão entre a estimativa de Tommaselli e Bacchi (2001) com o gravimétrico para os valores maiores que $0,36 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, sendo o modelo que mais aproximou-se do observado neste trabalho com desempenho mediano, porém com diferença significativa entre todos os modelos testados (Tabela 2). O modelo de Malicki et al. (1996) obtido na Europa e América do Sul e os de Ledieu et al. (1986) e Topp et al. (1980) apresentaram desempenho similar.

Mesmo considerando a inserção de parâmetros físicos do solo na parametrização do modelo de Roth et al. (1990) e Malicki et al. (1996), observaram comportamentos distintos e superestimativas da θ com desempenho mal e sofrível, respectivamente, para todos os critérios estatísticos (Figura 3), situação corroborada por Coelho et al. (2001) e por Gonçalves et al. (2011), ao constarem que os atributos físicos do solo podem introduzir erros de grande magnitude nas estimativas de θ pela TDR.

Observou-se, que a tubulação de PVC danifica a amostra de solo durante a penetração na profundidade de 0,3 m, assim como a inserção e retirada das hastes do sensor

nas amostras indeformadas para leva-las até a estufa. Percebeu-se, nos testes iniciais, que nas amostras deformadas houve maior entrada de ar, o que promove erros de leitura da K_a pela TDR, onde mudanças na densidade do material causa reflexões indesejadas com sub ou superestimativas da K_a , acarretando maior dispersão dos dados.

Para calibração é indicado o uso de amostra indeformada devido a maior proximidade da condição edafoclimática do campo (LIMA et al., 2018), o que permitirá o adequado funcionamento do sensor e o uso sustentável dos recursos hídricos na agricultura, responsável pela retirada da maior quantidade dos corpos hídricos do País (ANA, 2017).

CONCLUSÕES

1. Os modelos de calibração linear e polinomial cúbico podem ser utilizados na correção e estimativa da umidade volumétrica de água obtido com a TDR em Latossolo Amarelo Distrófico.
2. As equações Linear e Quadrática do CS616 não são adequadas, pois subestimaram os valores da constante dielétrica aparente do solo para as condições edafoclimáticas do Latossolo Amarelo Distrófico de Castanhal.
3. Os modelos físicos e empíricos da literatura superestimaram os valores da umidade do solo não sendo aplicáveis para o solo estudado.
4. Recomenda-se a equação Linear da fabricante, caso a calibração local não seja realizada, assim como o uso de amostras indeformadas para calibração de sensores com TDR.

AGRADECIMENTOS

O autor HGGCN agradece ao PCI-MCTIC / MPEG e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa (número do processo: 302200 / 2020-7).

CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE NO LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA
TIME DOMAIN REFLECTOMETRY NA AMAZÔNIA

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C. A. B.; ANTONINO, A. C. D.; PIMENTEL, R. M. M.; LIRA, C. A. B. O.; LIMA, J. R. S. Influência da densidade na estimativa da umidade volumétrica em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 5, p. 1056-1066, 2012. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i5.232894>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **ATLAS Irrigação: uso da água na agricultura irrigada 2017**. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/AtlasIrigacaoUsodaAguanaAgricaturaIrigada.pdf>>. Acesso em: 14 janeiro 2018.
- BASSEGIO, D.; SANTOS, R. F.; SECCO, D.; SOUZA, S. N. M.; JUNIOR, L. A. Z.; JADOSKI, S. O. Variação do nível do lençol freático no crescimento de plantas daninhas. **Revista Cultivando o Saber**, v. 5, n. 1, p. 146-157, 2012.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, T. R. A. de; MASSARANDUBA, W. de M.; FONTENELE, S. de B.; LANDIM, R. B. T. V.; MENDONÇA, L. A. R. Ajuste de modelo para determinar a umidade em Neossolo Flúvico com uso de uma sonda *Time Domain Reflectometry* (TDR). **Revista Agrarian**, v. 8, n. 27, p. 57-63, 2015.
- COELHO, E. F.; ANDRADE, C. L. T.; OR, D.; LOPES, L. C.; SOUZA, C. F. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade Trase. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 81-87, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S141543662001000100015>
- COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; LEDO, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 23-30, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000100003>
- DUTRA, C. C.; PRADO, E. A. F.; PAIM, L. R.; SCALON, S. P. Q. Desenvolvimento de plantas de girassol sob diferentes condições de fornecimento de água. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 1, p. 2657-2667, 2012. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33Supl1p2657
- FARIAS, V. D. da S.; LIMA, M. J. A. de; NUNES, H. G. G. C.; SOUSA, D. de P.; SOUZA, P. J de O. P. de. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 190-200, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>
- FRANCESCA, V.; OSVALDO, F.; STEFANO, P.; PAOLA, R. P. Soil moisture measurements comparison of instrumentation performances. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 136, n. 2, p. 81-89, 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2010\)136:2\(81\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2010)136:2(81))
- GONÇALVES, A. C. A.; TRINTINALHA, M. A.; TORMENTA, C. A.; FOLEGATTI, M. V. Influencia da densidade do solo na estimativa da umidade em um nitossolo vermelho distroférico, por meio da técnica TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1551-1560, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S010006832011000>

- GUIMARÃES, C. M.; COSTA, C. A. G.; CARNEIRO, L. F.; ASSUNÇÃO, H. F. da. Response of the TDR sensor to moisture under different types of management of a typical Latosol in the Cerrado. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 1, p. 1-7, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20190001>
- JAMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT 1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research**, v. 27, n. 4, p. 337-350, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3)
- LEDIEU, J.; RIDDER, P. de; CLERCK, P. de; DAUTREBANDE, S. A method for measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, v. 88, n. 3-4, p. 319-328, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90097-1)
- LIMA, J. G. A.; OLIVEIRA, A. S. de; SOUZA, L. da S.; SILVA, N. D. da; VIANA, P. C. Calibration of a soil moisture sensor with disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 10, p. 696-701, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p696-701>
- MALICKI, M. A.; PLAGGE, R.; ROTH, C. H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **European Journal of Soil Science**, v. 47, n. 3, p. 357-366, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01409.x>
- ROTH, C. H.; SCHULIN, R.; FLUHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of time-domain reflectometry for water content measurement using composite dielectric approach. **Water Resources Research**, v. 26, n. 10, p. 2267-2273, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02267>
- SANTANA, J. A. V.; COELHO, E. F.; SILVA JUNIOR, J. J.; SANTANA JUNIOR, E. B.; VEINROMBER JUNIOR, L. A. A. Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1123-1130, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000400007>
- SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas TDR. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 34, n. 2, p. 299-307, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200003>
- SANTOS, H. G dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 3, 2013. 353 p.
- SERRARENS, D.; MACINTYRE, J. L.; HOPMANS, J. W.; BASSOI, L. H. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 2, p. 349-354, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162000000200024>
- SOUZA, P. J. de O. P de; LIMA, M. J. A.; FARIAS, V. D. da S.; RAMOS, T. E.; SOUSA, A. M. L. de. Biomass and leaf area production and yield of cowpea under regimes in Castanhal, Pará. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 748-759, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n323rc>
- SOUZA, R. O. R. M.; PANTOJA, A. V.; AMARAL, M. A. C. M.; NETO, J. A. P. Cenário da agricultura irrigada no estado do Pará. **Irriga**, v. 17, n. 2, p. 177-188, 2012. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v17->

CALIBRAÇÃO E ESTIMATIVA DA UMIDADE NO LATOSSOLO AMARELO DISTRÓFICO PELA
TIME DOMAIN REFLECTOMETRY NA AMAZÔNIA

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

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100204X2001000900008>

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

content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>

WANG, F.; CHEN, X.; LUO, G.; DING J.; CHEN, X. Detecting soil salinity with arid fraction integrated index and salinity index in feature space using Landsat TM imagery. **Journal Arid Land**, v. 5, n. 3, p. 340 – 353, 2013. DOI: [10.1007/s40333-013-0183-x](https://doi.org/10.1007/s40333-013-0183-x)

WILMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.