



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

ÍCARO VASCONCELOS DO NASCIMENTO

**SONDA DE CAPACITÂNCIA E HYDRUS-1D COMO FACILITADORES NA
ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN**

FORTALEZA

2019

ÍCARO VASCONCELOS DO NASCIMENTO

SONDA DE CAPACITÂNCIA E HYDRUS-1D COMO FACILITADORES NA
ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Departamento de Ciências do Solo, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre. Área de Concentração: Manejo do Solo e da Água.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N199s Nascimento, Ícaro Vasconcelos do.
Sonda de capacitância e Hydrus-1D como facilitadores na estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten / Ícaro Vasconcelos do Nascimento. – 2019.
47 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

1. Curva de água no solo. 2. Instrumentação na agricultura. 3. Perfil instantâneo. I. Título.

CDD 631.4

ÍCARO VASCONCELOS DO NASCIMENTO

SONDA DE CAPACITÂNCIA E HYDRUS-1D COMO FACILITADORES NA
ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, do Departamento de Ciências do Solo, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre. Área de Concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovado em: 15/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Carlos de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A meu avô, Waldemar Moreira do Nascimento;
ao colega de curso, Francisco Helison Moreira
Coutinho. Ambos em saudosa memória.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por renovar diariamente minhas forças frente aos afazeres da vida.

Aos meus pais, Antônio Augusto do Nascimento e Maria Zenilda Ferreira Vasconcelos, por todo amor e preocupação com a qualidade da educação que recebi.

A meu avô, Waldemar Moreira do Nascimento (*In memoriam*), grande contador de histórias, com quem tive o prazer de viver memoráveis momentos.

À minha irmã, Carla Danielle Vasconcelos do Nascimento, com quem dividi e ainda divido parte da minha vida.

À minha namorada, Paloma Eleutério Bezerra, pelo companheirismo diário e todo o amor a mim dispensado.

Aos meus demais familiares que, cada um com a sua contribuição, ajudaram a construir a sólida base familiar na qual estou inserido.

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela orientação, amizade e exemplo de profissional.

Ao Prof. Dr. José Carlos de Araújo, pelas valiosas contribuições quando este trabalho ainda possuía o status de projeto, além da sua participação na banca de avaliação do produto que é esta dissertação.

Ao Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pela amizade, ensinamentos e contribuições com o projeto que hoje é apresentado na forma de dissertação.

Ao Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra que, além de ter participado na minha formação, emprestou-me parte do seu tempo com suas contribuições no projeto que originou este trabalho.

Ao Prof. Dr. Helon Hébano de Freitas Sousa, pela amizade e disponibilidade em participar da banca de defesa desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Raul Shiso Toma, coordenador do Grupo de ensino, pesquisa e extensão em solos da UFC – GepeSolos, pelos ensinamentos e por ter se disponibilizado como suplente na banca de defesa deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Thiago Leite de Alencar e ao Dr. Alcione Freire Guimarães, pela amizade, disponibilidade e treinamento com o modelo Hydrus-1D.

Ao amigo Prof. Dr. José Othon Dantas Lopes, por todo o apoio que me fora dado em épocas turbulentas.

Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi por ter, em uma semana, me feito encarar a Física do Solo com uma nova ótica.

Ao amigo Márcio Régys, pela fotografia das parcelas experimentais.

Aos colegas da pós-graduação, especialmente Ana Carla, André Nogueira (Cabeção), Angélica da Silva, Emanuela Barbosa, Éricka Paloma (Vários trabalhos), João Marcos, Prof. Nailton e Raquel da Hora, pela amizade, cooperação e constante troca de saberes.

Aos colegas do grupo de pesquisa em Física/Gênese do Solo, em especial, Alexandre Queiroz, Cillas Pollicarto, Lucas Oliveira, Márcio Godofredo e Tâncio Guthier, pela amizade e ajuda na execução das atividades ligadas a este trabalho.

Aos funcionários da Universidade Federal do Ceará, principalmente os lotados no Departamento de Ciências do Solo, em especial Deyse de Sousa, Dona Helena, Francisco José (Franzé/Franza), José Edilson Dote e Marilene Bezerra, pela presteza na realização dos afazeres diários.

Aos mestres responsáveis pela minha formação, desde o jardim de infância até a pós-graduação, cujos ensinamentos me trouxeram até aqui.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP, pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo.

Aos demais que, de alguma forma, tenham contribuído com este trabalho.

“Longe do estéril turbilhão da rua, Beditino escreve! No aconchego do claustro, na paciência e no sossego, trabalha, e teima, e lima, e sofre, e sua [...]”. Olavo Bilac.

RESUMO

O Hydrus-1D é um modelo inverso que permite a estimativa de parâmetros hidráulicos do solo. A hipótese deste trabalho foi de que a parametrização da equação de van Genuchten por modelagem inversa com o Hydrus-1D, utilizando dados da variação temporal do potencial mátrico (obtido por tensiometria) e umidade (obtida por gravimetria e por sonda FDR – *Frequency Domain Reflectometry*), resulta em curvas de água no solo (CAS) tão condizentes com as condições de campo quanto aquelas obtidas em laboratório. O objetivo foi obter os parâmetros do modelo de van Genuchten, pelo Hydrus-1D, com dados da variação temporal de potencial mátrico (obtido por tensiometria) e umidade (obtida pelo método gravimétrico e por sonda FDR), como também em laboratório, para, posteriormente, comparar tais resultados. Para isso, foram obtidos dados de potencial mátrico e umidade ao longo do tempo em experimento tipo perfil instantâneo, em Fortaleza/CE. Utilizaram-se quatro parcelas experimentais (1,5 x 2,0 x 0,5 m) com solo das classes texturais areia franca e areia. Em cada parcela foi instalado um tubo de acesso à sonda FDR (Diviner 2000) e, distando 0,3 m do tubo, tensiômetros com manômetro de Hg nas profundidades de 0,2 e 0,4 m. Concomitante às leituras da sonda e dos tensiômetros, foram coletadas amostras de solo em cada profundidade. A umidade volumétrica foi calculada pelo produto da umidade gravimétrica pela densidade do solo (em g cm^{-3}). Ao fim do experimento, quando a taxa de drenagem insignificante foi atingida, foram coletadas amostras de solo com estrutura deformada e indeformada. Em laboratório, realizaram-se análises de densidade do solo e de partículas, porosidade e obtenção da CAS. As CAS foram ajustadas pelo modelo de van Genuchten (com $m=1/n$). Com o Hydrus-1D, foram obtidos quatro parâmetros da equação de van Genuchten (com $m=1/n$). Os dados foram analisados com o delineamento inteiramente casualizado 4 x 4 (quatro procedimentos experimentais e quatro repetições). Foi aplicado o teste de Jarque-Bera para verificar a normalidade e o teste de Tukey para comparação das médias, ambos com $p = 0,05$. Também foram plotadas as curvas de umidade versus tempo simulando o experimento pelo Hydrus-1D. O desempenho do modelo foi avaliado pelo coeficiente de eficiência e raiz quadrática do erro médio. Concluiu-se que a parametrização da equação de van Genuchten por modelagem inversa com o Hydrus-1D, utilizando dados de umidade obtida por gravimetria e por sonda FDR, resulta em curvas de distribuição de água no solo coerentes com as condições de campo; e a utilização do Hydrus-1D com dados de umidade obtidos com sonda FDR é bastante prática e concisa, retornando bons resultados e facilitando o processo de obtenção da CAS.

Palavras-chave: Curva de água no solo. Instrumentação na agricultura. Perfil instantâneo.

ABSTRACT

Hydrus-1D is an inverse model that allows the estimation of soil hydraulic parameters. The hypothesis was: the parametrization of the van Genuchten equation by inverse modeling with Hydrus-1D, using data of temporal variation of the matric potential (obtained by tensiometry) and moisture (obtained by gravimetry and by FDR - Frequency Domain Reflectometry - probe) results in soil-water curves (SWC) as consistent with the field conditions as those obtained in the laboratory. The aim was to obtain the parameters of the van Genuchten model, with Hydrus-1D, using data of the temporal variation of matric potential (obtained by tensiometry) and moisture (obtained by gravimetric method and FDR probe), as well as in laboratory, to then compare these results. For this, data of matric potential and moisture over the time were obtained in an instantaneous profile experiment, in Fortaleza/CE. Four experimental plots (1.5 x 2.0 x 0.5 m) were assembled with soil from the textural classes loamy-sand and sand. In each plot, an FDR probe (Diviner 2000) access tube was installed, and, apart 0.3 m from the tube, were installed tensiometers with a Hg manometer at depths of 0.2 and 0.4 m. Concomitant to the probe and tensiometers readings, soil samples were collected at each depth. Volumetric moisture was calculated by the product of gravimetric moisture by soil density (in g cm^{-3}). At the end of the experiment, when the insignificant drainage rate was reached, soil samples with disturbed and undisturbed structure were collected. In the laboratory, analyzes of soil and particle density, porosity and SWC were performed. The SWC were adjusted by the van Genuchten model (with $m = 1 / n$). With Hydrus-1D, four parameters of the van Genuchten equation (with $m = 1 / n$) were obtained. The data were analyzed with the completely randomized design 4 x 4 (four experimental procedures and four replicates). The Jarque-Bera test was used to verify normality and Tukey's test for comparison of means, both with $p = 0.05$. The curves of moisture over the time simulated by Hydrus-1D were also plotted. The performance of the model was evaluated by the coefficient of efficiency and root mean square error. It was concluded that the parametrization of the van Genuchten equation by Hydrus-1D, with moisture data (obtained by gravimetry and by FDR probe), results in SWC as consistent with the field conditions as those obtained in the laboratory; and the use of Hydrus-1D with moisture data obtained with FDR probe is very practical and concise, returning good results and facilitating the process of obtaining the SWC.

Keywords: Soil-water curve. Instrumentation in agriculture. Instantaneous profile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Esquema de instalação de tensiômetro com manômetro de mercúrio....	21
Figura 2	–	Vista aérea das parcelas experimentais no campo.....	27
Figura 3	–	Perfil do corpo de prova no cenário do modelo Hydrus-1D.....	30
Figura 4	–	A – Variação da umidade com o tempo para a profundidade de 0,20 m. B – Variação da umidade com o tempo para a profundidade de 0,40 m.....	33
Figura 5	–	A – Curvas de água no solo para a profundidade de 0,20 m. B – Curvas de água no solo para a profundidade de 0,40 m.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Granulometria do corpo de prova.....	27
Tabela 2	– Médias dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para as profundidades de 0,2 e 0,4 m.....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Água no solo: importância agrícola e retenção	15
2.2	Dinâmica da água no solo: o experimento tipo perfil instantâneo	17
2.3	Métodos para mensurar a água no solo	19
2.3.1	<i>Gravimetria</i>	20
2.3.2	<i>Tensiometria</i>	21
2.3.3	<i>Sonda de capacitância</i>	22
2.4	Modelagem inversa: o Hydrus-1D	24
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Trabalhos de campo	27
3.2	Trabalhos de laboratório	28
3.2.1	<i>Densidade do solo</i>	28
3.2.2	<i>Densidade das partículas</i>	29
3.2.5	<i>Curva de água no solo</i>	29
3.3	Obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten	29
3.4	Análise estatística dos dados	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Água e vida apresentam relação estreita, sendo que a presença ou não do recurso regula a distribuição espacial da vida na terra. A água é fundamental para o desenvolvimento vegetal, desempenhando funções bioquímicas e até mesmo participando da nutrição das plantas, que absorvem nutrientes da solução aquosa do solo. Assim, um correto manejo da água na agricultura é essencial para garantir que as plantas expressem seu máximo potencial genético, maximizando a produtividade das lavouras e diminuindo ao máximo os impactos ao ambiente.

Uma vez que o solo é um reservatório de água para as plantas, é importante conhecer suas propriedades de retenção e redistribuição de água. A retenção é associada aos fenômenos de adsorção, pela interação da água com a matriz do solo, e a capilaridade, relacionada às interfaces solo-água-ar dos poros capilares; já a movimentação da água no solo se dá por diferença de energia potencial, que é a energia que um corpo possui dada a sua posição em um campo de forças, com a fase líquida se deslocando de pontos de maior energia para pontos menos energéticos.

Tendo o solo como reservatório, a sua umidade pode ser quantificada por diversos métodos, que se dividem em diretos e indiretos. Nos primeiros, a água é mensurada de maneira direta, enquanto os últimos se baseiam na correlação entre a umidade e algumas propriedades como a constante dielétrica do solo, potencial mátrico da água, atenuação de nêutrons e outros. O método gravimétrico, com secagem de amostras em estufa a 105 °C até a massa constante, e obtenção da massa da água por pesagem, é considerado o método padrão, devido sua precisão, enquanto que, como exemplo de métodos indiretos, pode-se citar a sonda FDR (*Frequency domain reflectometry*), também conhecida como sonda de capacitância, que estabelece relação entre a umidade e a constante dielétrica do solo, e a tensiometria, que correlaciona a umidade do solo à energia com que a água nele está retida, dentre outros.

Uma das grandes desvantagens do método gravimétrico é a demora na aquisição dos dados, enquanto na agricultura, geralmente, precisa-se de medidas rápidas da umidade para a tomada de decisão no referente ao manejo da água e a entrada de maquinaria sobre o solo. O método também é destrutivo, portanto, demanda a coleta de amostras de solo sempre que a umidade for mensurada. Portanto, por vezes é necessário recorrer a métodos indiretos como a sonda FDR, que apresenta como principal vantagem a rapidez e versatilidade, entretanto, além de demandar calibração, o equipamento ainda carece de avaliações da acurácia de suas medidas.

Uma ferramenta que auxilia no manejo da água na agricultura é a curva de água no solo – CAS, que consiste na representação gráfica da relação entre a umidade e a energia na

qual a água está retida no solo (potencial mátrico). Essa curva permite monitorar a umidade do solo com dados de potencial mátrico, visando fornecer água para as plantas sem excesso ou déficit, além de ser um indicador da qualidade física do solo, uma vez que seu formato advém da distribuição de poros por tamanho. O formato da CAS é, geralmente, descrito por modelos empíricos. O modelo de van Genuchten (1980), com cinco parâmetros (θ_s , θ_r , α , m e n), é um dos mais utilizados atualmente, pois ajusta bem curvas advindas de uma grande variedade de solos.

A CAS é normalmente obtida em laboratório, em aparelho extrator de Richards. Aplica-se uma pressão e se espera até que a água no interior da amostra entre em equilíbrio com a força aplicada. A água remanescente na amostra é determinada gravimetricamente e dá origem aos pontos da curva.

Existem dificuldades operacionais e instrumentais atreladas à obtenção da CAS em laboratório, especialmente devido à demora na sua aquisição, bem como o alto custo do equipamento. Nesse contexto, a modelagem inversa, que permite obter uma variável por meio da solução de um problema matemático inverso, ou seja, que parte dos efeitos e chega à causa, aparece como um viés alternativo na estimativa de parâmetros hidráulicos do solo.

O Hydrus-1D, cuja versão mais recente (4.17) é de autoria de ŠIMŮNEK *et al.* (2016), é um exemplo de modelo inverso que permite a obtenção de parâmetros hidráulicos do solo tais como os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) e, por conseguinte, a CAS. Para isso, o usuário insere dados referentes à variação da umidade ou do potencial mátrico no tempo.

Portanto, diante do exposto, a hipótese deste trabalho foi a seguinte: a parametrização da equação de van Genuchten por modelagem inversa com o Hydrus-1D, utilizando dados da variação temporal do potencial mátrico (obtido por tensiometria) e umidade (obtida por gravimetria e por sonda FDR), resulta em curvas de água no solo tão condizentes com as condições de campo quanto aquelas obtidas em laboratório. Assim, o objetivo desta pesquisa foi obter os parâmetros do modelo de van Genuchten, pelo Hydrus-1D, com dados da variação temporal de potencial mátrico (obtido por tensiometria) e umidade (obtida por gravimetria e por sonda FDR), como também em laboratório.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Água no solo: importância agrícola e retenção

Existe uma forte relação entre a água e a vida. Regiões onde não existe escassez desse recurso, tais como as florestas tropicais úmidas, são dotadas de maior diversidade biológica em relação a áreas de baixa pluviosidade, como os grandes desertos (PIMENTEL, 2004).

Nas plantas, a água representa cerca de 95% da massa fresca de órgãos como os frutos e as folhas novas, desempenhando, por exemplo, funções estruturais, constituindo o meio onde se processam inúmeras reações bioquímicas vitais ao metabolismo vegetal e exercendo papel de veículo para absorção de nutrientes pelas raízes. Assim, do ponto de vista agrícola, é importante que as plantas sejam bem supridas de água para que possam expressar seu máximo potencial genético, uma vez que tanto a deficiência quanto o excesso hídrico podem prejudicar o seu desenvolvimento de maneira irreversível (COELHO FILHO *et al.*, 2011).

Entre suas inúmeras funções, o solo constitui um reservatório de água para as plantas. A retenção de água no solo está associada a dois fenômenos: adsorção, em que a água é retida na matriz do solo devido a interações moleculares; e capilaridade, em que a água é retida nos chamados poros capilares numa interface sólido-água-ar, sendo função da tensão superficial e do ângulo de contato da água com a fase sólida. Partindo da saturação, em condição de drenagem livre, as forças capilares são dominantes e, à medida que o solo seca, a adsorção adquire efeito mais marcante (LIBARDI, 2018).

Dada a correlação entre manejo da água e produtividade vegetal, o conhecimento da relação solo-água é de suma importância no âmbito agrícola, pois direciona estratégias que levem ao máximo rendimento dos vegetais (IMHOFF *et al.*, 2016) com o mínimo impacto ao ambiente, já que a possível escassez desse recurso é uma ameaça ao suprimento global de alimentos (COELHO FILHO *et al.*, 2011). Outro fato importante é que, o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo, tais como a retenção de água, além da aplicabilidade na produção vegetal, é útil à modelagem hidrológica e meteorológica (DURIGON; VAN LIER 2011).

Existe correlação entre o potencial mátrico (ϕ_m) e o conteúdo volumétrico de água no solo (θ), pois quanto mais seco o solo mais negativo é o ϕ_m . Tal relação é de suma importância em estudos da relação solo-água (LUCAS *et al.*, 2011) e pode ser expressa matematicamente por $\theta = f(\phi_m)$ (ALMEIDA *et al.*, 2015). A representação gráfica dessas

funções é denominada curva de água no solo – CAS. Essa curva auxilia na avaliação do teor de água disponível e atual no solo, além de outras variáveis básicas à execução do manejo adequado da irrigação (COSTA *et al.*, 2008).

Existem vários métodos de obtenção da CAS, tanto em campo quanto em laboratório (COSTA *et al.*, 2008). O método comumente empregado é de laboratório, que utiliza o extrator de placa porosa proposto por Richards e Fireman (1943). Nesse método, as amostras de solo, previamente saturadas, são postas em contato a uma placa porosa, também saturada, e acomodadas em uma câmara na qual aplica-se pressão por intermédio de um sistema de compressor controlado por um manômetro. Dessa forma, extração da água se dá por um diferencial de potencial entre a base da placa e a amostra de solo, de modo que a diferença entre a massa da amostra antes e depois do procedimento é igual à massa de água que se equilibrou com a pressão aplicada (MENEZES *et al.*, 2018).

A CAS, geralmente, é descrita por uma equação empírica, com obtenção dos parâmetros por ajuste não linear. O modelo de van Genuchten (1980) (Equação 1), com cinco parâmetros empíricos (θ_s , θ_r , α , m e n), é um dos mais utilizados para esse fim, por se ajustar a dados advindos de uma ampla variedade de solos (XIANG-WEI *et al.*, 2010),

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\phi_m|^n)]^m}, \quad (1)$$

em que θ corresponde ao conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (m), α um escalonador do ϕ_m (m^{-1}), e m e n são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva.

Em relação aos parâmetros da equação de van Genuchten (1980), o θ_s corresponde à umidade do solo na saturação. Sua determinação, segundo o autor, pode ser realizada utilizando o método gravimétrico, pela mensuração da massa de água presente na massa de solo saturado. O parâmetro θ_r é de difícil determinação experimental (CASTRO *et al.*, 2002) e refere-se à umidade mais aproximada possível da condição de solo seco. Sendo assim, pode-se utilizar o valor da umidade do solo no potencial mátrico de -150 mca, considerado o ponto de murcha para a maioria das espécies cultivadas, para definir o parâmetro. Já o parâmetro α , ainda segundo Castro *et al.* (2002), está associado ao inverso do valor de potencial mátrico em que ocorre entrada de ar no maior poro do solo (cavitação). Embora tal significado físico seja

atribuído à variável α , e essa atribuição seja amplamente aceita pela comunidade científica, van Lier e Pinheiro (2018) relatam que o parâmetro é apenas um “escalador” do potencial mátrico.

Os demais parâmetros não têm significado físico aparente, entretanto, segundo van Genuchten (1980), os parâmetros m e n são relacionados à forma da curva. Para o autor, o parâmetro n , em especial, é um índice da distribuição dos poros por tamanho e relaciona-se, por conseguinte, com a inclinação da curva característica de água no solo. Para Alencar (2017) o parâmetro n , por ser relacionado à porosidade do solo, também possui influência direta sobre o ponto de inflexão da CAS. Logo, variações em n implicam mudanças em outras variáveis advindas da curva, como é o caso da capacidade de campo que, para Dexter e Bird (2001), é definida pela inflexão da CAS. Entende-se por inflexão da CAS o ponto em que a curva altera a sua direção, sinalizando a mudança de poros estruturais ou de drenagem (entre agregados) para poros texturais ou de retenção de água (no interior dos agregados) (ASCHONITES et al., 2013).

Para Jorge, Corá e Barbosa (2010), uma CAS pode ser considerada, do ponto de vista matemático, igual à outra e, portanto, orientar de maneira similar o manejo de irrigação, caso nenhum dos parâmetros da equação de van Genuchten difira entre ambas.

2.2 Dinâmica da água no solo: o experimento tipo perfil instantâneo.

A água no solo não é estática, deslocando-se de pontos de maior energia para pontos de menor energia para atingir um estado energético mínimo (DUARTE *et al.*, 2015). O estado energético da água é determinado pela energia potencial, que é a energia que um corpo possui devido à sua posição em um campo de força. A energia cinética não é considerada, pois a velocidade de deslocamento da água no solo é desprezível. Assim, a energia potencial da água no solo pode ser definida como a quantidade de trabalho necessária para transferir, de forma reversível e isotérmica, uma quantidade infinitesimal de água do estado de referência para a fase líquida do solo em um ponto considerado. Assume-se como estado de referência um depósito hipotético de água pura, livre, sob pressão atmosférica, mesma temperatura da água no solo e elevação de referência fixa (AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008).

O potencial total (ϕ_t) da água no solo é soma dos componentes potencial gravitacional (ϕ_g), de pressão (ϕ_p) e mátrico (ϕ_m). O potencial gravitacional (ϕ_g), é a atração que a gravidade impõe à água do solo, sendo sempre igual à distância do ponto em questão até o plano adotado como referência; o potencial de pressão (ϕ_p), que somente ocorre em condição

de solo saturado, aparece sempre que a pressão em um ponto da solução do solo é diferente e maior do que a pressão atmosférica; e o potencial mátrico (ϕ_m) é relacionado com as forças de adsorção e capilaridade, consistindo na atração que a fase sólida do solo (ou matriz) impõe à água (LIBARDI, 2018).

Uma propriedade hidráulica com grande influência na dinâmica da água no solo é a condutividade hidráulica que, por definição, exprime a facilidade com que a água se movimenta por seu espaço poroso (GONÇALVES; LIBARDI, 2013), podendo ser obtida tanto em campo quanto em laboratório (NASCIMENTO *et al.*, 2017).

Henry Darcy foi o primeiro a estudar e estabelecer uma equação que quantifica o fluxo de água em meio poroso, em 1856, ao estabelecer que a quantidade de água que passa por um meio poroso por unidade de tempo é proporcional ao gradiente de potencial total da água nesse meio. A constante de proporcionalidade foi denominada condutividade hidráulica (LIBARDI, 2018). Buckingham (1907) estudou o movimento da água em meio poroso não saturado, chegando à chamada equação de Darcy-Buckingham (LIU, 2017). Já Richards (1931) relacionou a equação da continuidade com a equação de Darcy-Buckingham e obteve a equação geral que descreve o movimento da água no solo não saturado, conhecida como equação de Richards, vista a seguir:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[K \left(\frac{\partial \phi_t}{\partial x} \right) \right], \quad (2)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água ($L^3 L^{-3}$), t é o tempo (T), K é a condutividade hidráulica do solo não saturado ($L T^{-1}$), ϕ_t é o potencial total da água no solo (L), e x é a coordenada espacial (L).

O método do perfil instantâneo, baseado em experimento de drenagem interna em campo, é tido como uma das melhores alternativas para medição da condutividade hidráulica (K), expressando, rotineiramente, a variável em função da umidade volumétrica – $K(\theta)$ – ou ainda em função do potencial mátrico – $K(\phi_m)$ (HURTADO; CICHOTA; VAN LIER, 2005).

O método do perfil instantâneo se baseia na solução numérica da equação de Richards (1931) e possibilita obter a função $K(\theta)$, em campo, a partir da aquisição de dados referentes à variação da umidade ou do potencial mátrico durante o processo de drenagem de uma parcela previamente saturada, em que o fluxo na superfície do solo é zero (GHIBERTO; MORAES, 2011).

Segundo Gonçalves e Libardi (2013), a principal vantagem do método do perfil instantâneo é a obtenção de medidas diretas no campo, portanto, os valores de condutividade hidráulica são mais coerentes do que aqueles obtidos em laboratório. Para van Lier (2002), outra vantagem é não necessitar aguardar o estabelecimento de um equilíbrio dinâmico, assim como a possibilidade de se analisar uma grande amplitude de umidades. Ainda segundo van Lier (2002), uma das grandes desvantagens desse método é que o acompanhamento de um experimento dessa natureza demanda um investimento considerável em tempo e mão de obra.

Watson (1966), em experimento com colunas de solo de textura arenosa, é tido como o idealizador do método. Segundo o autor, com seu método é possível medir a velocidade de escoamento, gradiente de potencial e conteúdo de água em qualquer instante depois do início do processo de drenagem, e obter a condutividade hidráulica.

Na década seguinte, Hillel *et al.* (1972) propuseram método para obtenção da condutividade hidráulica, em campo, em parcela de solo previamente saturada. Os autores consideraram o comportamento da umidade e do potencial mátrico no tempo para obter as variáveis densidade de fluxo e gradiente de potencial da equação de Richards (1931), para, então, obter a função $K(\theta)$.

Libardi *et al.* (1980) propuseram a simplificação do método do perfil instantâneo considerando o gradiente de potencial unitário, de forma que o monitoramento da umidade ou potencial mátrico se dá apenas na profundidade onde se quer medir a condutividade hidráulica, sem a necessidade de se adquirir dados referentes à outras profundidades para a obtenção do gradiente de potencial. Os autores indicam a utilização deste artifício para solos homogêneos, entretanto, Prevedello *et al.* (1994), ao utilizarem o gradiente unitário mesmo em colunas de solo ditas como homogêneas, encontraram erros de 73% na obtenção da variável, com subestimação dos resultados.

2.3 Métodos para mensurar a água no solo

A umidade é um índice básico na caracterização da quantidade de água presente em uma amostra de solo, podendo ser expressa tanto por unidades de massa (massa de água/massa de partículas) quanto por unidades de volume de solo (BRADY; WEIL, 2013). Dentre suas aplicações práticas, a umidade do solo é um indicador fundamental para diversas operações agrícolas como irrigação e preparo mecanizado de terras (BUSKE *et al.*, 2014).

A umidade do solo pode ser mensurada por diversos métodos, que se dividem em diretos, como o método gravimétrico em que, como o próprio nome sugere, a variável é

mensurada de maneira direta; e indiretos, que se baseiam na correlação entre a umidade e outras propriedades como moderação de nêutrons, resistência à propagação de pulsos elétricos, (SOUZA; MATSURA, 2002), potencial matricial da água no solo, entre outras (BUSKE, 2013). A seguir, são detalhados três métodos que se prestam a esse a mensuração da água do solo.

2.3.1 Gravimetria

O método gravimétrico é procedimento para medição direta do teor de água no solo, sendo considerado, dada a sua precisão, o padrão para a calibração de métodos indiretos (TEIXEIRA; MORAES; SIMONETE, 2005). Nesse método, a água presente em uma massa de solo (ou em dado volume, desde que se tenha informação sobre a densidade do solo) (DAMALGO *et al.*, 2017) é quantificada da seguinte forma: uma amostra de solo úmido é pesada e, posteriormente, seca em estufa a temperatura de 105 °C até massa constante, quando é novamente pesada e a perda de massa representa a umidade do solo (WANG *et al.*, 2018). A umidade, por unidades de massa, é calculada pela seguinte equação (a letra maiúscula, entre parêntesis, corresponde à dimensão da variável, sendo M – *Mass/Massa*; e L – *Length/Comprimento*):

$$u = (msu - mss)/mss, \quad (3)$$

em que u é a umidade por unidades de massa (M), msu é a massa do solo úmido (M) e mss é a massa do solo seco ou das partículas (M). Para obter a porcentagem de água por unidades de massa, basta multiplicar o valor de u (um decimal) por 100.

Em posse da densidade do solo, a umidade, por unidades de volume, pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\theta = u \times (\rho_s/\rho_a), \quad (4)$$

em que θ é a umidade por de volume ($L^3 L^{-3}$), u é a umidade por unidades de massa (M), ρ_s a densidade do solo ($M L^{-3}$) e ρ_a a densidade da água ($M L^{-3}$). Para obter a porcentagem de água por unidades de volume, basta multiplicar o valor de θ (um decimal) por 100.

Apesar de ser simples e efetivo, o método gravimétrico é destrutivo, não permite leituras no mesmo ponto e não possibilita a obtenção de medidas rápidas de umidade (BORGES; PAROLIN, 2006) quando na agricultura, de modo geral, são necessárias medidas praticamente instantâneas da variável (LEPSCH, 2011). Portanto, por vezes é necessário

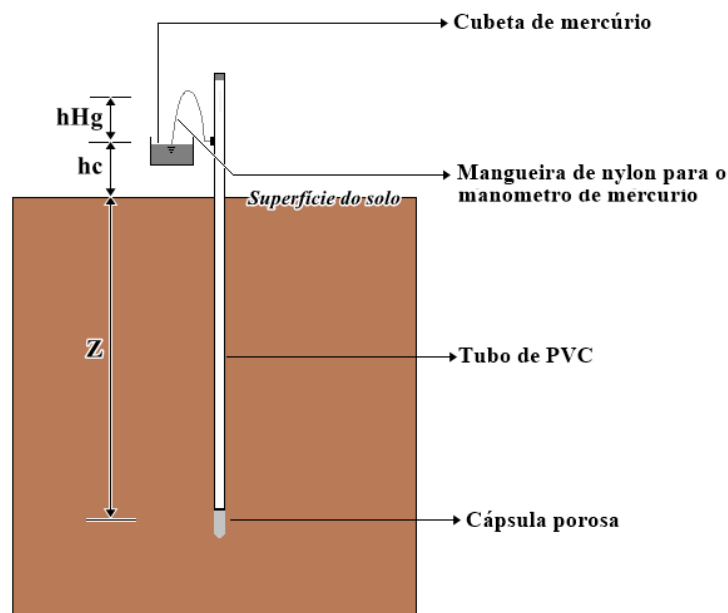
recorrer a métodos indiretos que possuam maior rapidez na avaliação da umidade do solo (BUSKE *et al.*, 2014).

2.3.2 Tensiometria

O tensiômetro é um equipamento capaz de medir a tensão com que a água está retida pela fase sólida do solo (ou potencial mátrico, quando a notação se dá com sinal negativo) (SOARES; FERNANDES, 2014), correlacionando essas medidas com a umidade atual do perfil (SANTOS, 2001). Para Or (2001), o tensiômetro foi primeiramente implementado por Livingston em 1908, enquanto para Coelho e Teixeira (2004) o equipamento foi desenvolvido por Gardner e seus colaboradores em 1922.

O tensiômetro é um instrumento simples, sendo composto, basicamente, por um tubo de PVC com uma cápsula de porcelana porosa acoplada em uma de suas extremidades. Na outra extremidade do tubo é conectado um medidor de tensão, seja ele um vacuômetro, tensímetro ou manômetro de mercúrio, sendo o último tido como o mais preciso (KANDELOUS; MORADI, HOPMANS, 2015). O funcionamento do equipamento se baseia na premissa de que a cápsula porosa, ao entrar em contato com o solo, permite o equilíbrio entre a água do solo e a água no interior do tensiômetro, de modo com que a tensão interna ao aparelho se iguale à tensão da água no solo e é medida pelo sistema de leitura adotado (FREIRE, 2016). Abaixo, esquema de instalação de tensiômetro com manômetro de mercúrio (Figura 1).

Figura 1. Esquema de instalação de tensiômetro com manômetro de mercúrio.



Legenda: vide equação (5). Fonte: Nascimento (2017).

As leituras, no manômetro de mercúrio, são feitas em alturas de Hg e são convertidas em potencial mátrico (ϕ_m , L) utilizando a equação (5). Após obtido, o potencial mátrico da água no solo pode ser correlacionado com a umidade por meio da CAS.

$$\phi_m = -1,26h_{Hg} + h_c + z , \quad (5)$$

em que h_{Hg} é a altura da coluna de Hg (L), h_c a altura do nível de Hg na cubeta em relação à superfície do solo (L), e z a profundidade de instalação do centro da cápsula porosa do tensiômetro (L).

Uma das limitações ao uso do tensiômetro é o fato de que o equipamento, por ser um sistema aberto (onde atua P_{atm}), funciona apenas em uma faixa de potenciais mátricos que não ultrapassam -1 atm, sendo que, geralmente, devido ao esquema de instalação, o limite superior desse intervalo é de aproximadamente -0,85 atm. Apesar disso, o intervalo citado é suficiente para possibilitar o manejo de água na agricultura, pois cobre as faixas de umidade com que se trabalha recorrentemente (REICHARDT; TIMM, 2012).

2.3.3 Sonda de capacitância

A umidade do solo pode ser mensurada indiretamente pelo equipamento denominado sonda de capacitância ou sonda FDR (*Frequency domain reflectometry*) que é constituído, basicamente, por um capacitor formado por um par de eletrodos ou placas metálicas paralelas, e um sistema de aquisição de dados (*Datalogger*) (SOUZA *et al.*, 2013).

Quando a região localizada entre os eletrodos de um capacitor é completamente preenchida com um material dielétrico (isolante), a capacitância – ou capacidade em armazenar uma carga (FRENZEL JUNIOR, 2016) – é multiplicada por um fator k , específico para o material, chamado de constante dielétrica (CARVALHO; SILVA, 2002). A sonda FDR se baseia nas variações da constante dielétrica do solo em função da umidade (SANTOS, 2005). Quanto o equipamento é ativado, o solo, como sistema trifásico, forma o meio dielétrico desse capacitor (ANDRADE JÚNIOR; SILVA; DANIEL, 2007) que é conectado a um circuito oscilatório no qual as trocas de frequência dependem das trocas de capacitância na matriz do solo (REICHARDT; TIMM, 2012). Dessa forma, a capacitância aumenta e a frequência do circuito diminui com o aumento da umidade do solo (PALTINEANU; STARR, 1997).

Além da rapidez na aquisição de informações, segundo Lima *et al.* (2012), a vantagem da sonda de capacitância em relação ao método direto é a possibilidade de, com um

único equipamento, realizar o levantamento e armazenamento de dados de umidade em diversas profundidades, locais e intervalos de tempo. Entretanto, ainda segundo os autores, os resultados obtidos com a sonda FDR podem apresentar problemas de acurácia e, portanto, sua utilização ainda necessita de verificações mais refinadas da veracidade das medidas obtidas.

A utilização da sonda de capacitância requer uma calibração prévia, em que o primeiro passo é registrar as leituras dentro de um tubo de PVC exposto ao ar e imerso em água. Nessa condição, a saída dos dados no *datalogger* é denominada de frequência relativa (*FR*) e é definida pela equação (6) (SENTEK, 2007),

$$FR = \frac{F_a - F_s}{F_a - F_w}, \quad (6)$$

em que F_a é a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC exposto ao ar, F_s é a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC no solo e F_w é a contagem da frequência da sonda no tubo de PVC imerso em água.

Os valores de umidade volumétrica (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e as correspondentes leituras de frequência relativa (*FR*) podem ser relacionados de maneira não-linear com dois ou três parâmetros (SILVA *et al.*, 2007) conforme os dados obtidos em diversas calibrações em campo (MORGAN *et al.*, 1999; HIDALGO *et al.*, 2003; FARES *et al.*, 2004; POLYAKOV *et al.*, 2005; ANDRADE JÚNIOR; SILVA; DANIEL (2007); SILVA *et al.*, 2007) e em laboratório (PALTINEANU; STARR, 1997; BAUMHARDT *et al.*, 2000; GROVES; ROSE, 2004; POLYAKOV *et al.*, 2005) como segue,

$$\theta = aFR^b \text{ ou } \theta = aFR^b + c, \quad (7)$$

em que θ é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), *FR* é a frequência relativa determinada pela sonda (adimensional), e *a*, *b* e *c* são coeficientes gerados pela regressão.

Monteiro *et al.* (2015), ao compararem valores de umidade obtidos com sonda modelo Diviner 2000® e pelo método padrão de estufa (gravimétrico) em Argissolo, concluíram que o equipamento possui bom desempenho, especialmente para umidades próximas $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. De igual modo, Souza *et al.* (2013), em estudo considerando um Nitossolo e um Latossolo, concluíram que o equipamento apresenta desempenho aceitável em relação ao método padrão, sendo de grande utilidade em situações em que a acurácia não seja essencial.

2.4 Modelagem inversa: o Hydrus-1D

Dadas as dificuldades operacionais e instrumentais atreladas à obtenção de certos parâmetros hidráulicos do solo, tais como a CAS, a exploração de metodologias alternativas para aquisição dessas informações vêm ganhando notoriedade. Uma alternativa é a modelagem inversa (NASCIMENTO *et al.*, 2018).

Um problema inverso, por definição, é aquele solucionado partindo das consequências de um fenômeno para assim chegar às suas causas, por um procedimento matemático de otimização de dados (ENGL; HANKE; NEUBAUER, 1996) que só é possível se as variáveis envolvidas possuírem relação física (HASANOĞLU; ROMANOV, 2017).

Os trabalhos iniciais com modelagem inversa retomam a Dane e Hruska (1983) e van Dam *et al.* (1992). Os primeiros obtiveram seus dados em campo, em experimento com drenagem livre, enquanto os últimos trabalharam em laboratório com amostras de solo com estrutura indeformada. Em ambos os casos, os autores obtiveram parâmetros hidráulicos do solo, de maneira indireta, por meio da solução da equação de Richards (1931).

Segundo Freire *et al.* (2018), Hydrus-1D, cuja versão mais recente (4.17) é de autoria de ŠIMŮNEK *et al.* (2016), é um modelo inverso amplamente difundido e que permite a obtenção de parâmetros hidráulicos do solo, bem como variáveis atreladas ao fluxo de calor e dinâmica de solutos.

Na estimativa de atributos hidráulicos do solo, como os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980), o Hydrus-1D demanda a inserção de dados referentes à evolução do potencial mátrico ou da umidade no tempo. Na otimização desses parâmetros, o modelo se baseia no método da minimização da soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e simulados (HOPMANS *et al.*, 2002).

Para a condição de solo não saturado, o Hydrus-1D fundamenta-se na forma modificada da equação de Richards para fluxo uniforme e unidimensional, assumindo como insignificante o efeito da fase gasosa e do gradiente térmico sobre o fluxo (ŠIMŮNEK *et al.*, 2016), como visto a seguir:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[K \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S, \quad (8)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água ($L^3 L^{-3}$), t é o tempo (T), K é a condutividade hidráulica do solo não saturado ($L T^{-1}$), ϕ_m é o potencial mátrico (L), x é a coordenada espacial

(L), α é o ângulo entre o fluxo e o eixo vertical ($\alpha = 0^\circ$ para fluxo vertical) e S é o termo sumidouro referentes às perdas do sistema ($L^3 L^{-3} T^{-1}$).

O termo condutividade hidráulica do solo não saturado advém da equação

$$K(\phi_m, x) = K_s(x) K_r(\phi_m, x), \quad (9)$$

em que K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado ($L T^{-1}$) e K_r é a condutividade hidráulica relativa do solo não saturado (-).

Já no referente à obtenção dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980), o Hydrus-1D baseia-se na sua relação teórica com o modelo estatístico de distribuição de poros por tamanho de Mualem (1976). A seguir tem-se, respectivamente, a expressão dos modelos de van Genuchten (1980) e Mualem (1976) com as condições de contorno admitidas no Hydrus-1D,

$$\theta(\phi_m) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \phi_m|^n]^m} & \phi_m < 0 \\ \theta_s & \phi_m > 0 = \phi_p \end{cases}, \quad (10)$$

$$K(\phi_m) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, \quad (11)$$

considerando-se que

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1, \quad (12)$$

em que $\theta(\phi_m)$ é o conteúdo volumétrico de água ($L^3 L^{-3}$) em função do potencial mátrico (L), θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ($L^3 L^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico (L), α um escalonador do ϕ_m (L^{-1}), m e n são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva, $K(\phi_m)$ é a condutividade hidráulica do solo não saturado como função do potencial mátrico ($L T^{-1}$), K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado ($L T^{-1}$), S_e é a saturação efetiva, e l é o parâmetro de conexão de poros (comumente 0,5).

Silva Júnior (2015) encontrou bons resultados ao modelar curvas de água no solo com o modelo Hydrus, desta vez utilizando a versão 2D. O autor comparou as curvas obtidas

por modelagem inversa com aquelas obtidas utilizando aparelho extrator de Richards, em laboratório, para quatro solos brasileiros. Pinho e Miranda (2014), ao estudar o movimento de água e solutos em colunas preenchidas com solos coletados em Piracicaba - SP, concluíram que o Hydrus-1D é uma boa ferramenta na estimativa de parâmetros hidráulicos desses solos.

Alencar (2017), ao confrontar curvas de água no solo obtidas em laboratório e pelo Hydrus-1D, considerando solos com as classes texturais areia-franca, franco-argilo-arenosa, argilo-arenosa e argila, concluiu que, de maneira geral, as curvas de laboratório tendem a superestimar o conteúdo de água no solo desde a saturação até o ponto de murcha permanente (-150 mca). O autor atribui tal divergência, principalmente, ao fato de que a amostra, ao ser analisada em laboratório, é totalmente saturada por capilaridade, o que quase não acontece em campo.

Para Nascimento *et al.* (2018) a CAS modelada com o Hydrus-1D é a que de fato representa o comportamento hidráulico do solo em campo, em detrimento daquela obtida em laboratório. Os autores chegaram a essa conclusão após obterem os parâmetros da equação de van Genuchten (1980), com o Hydrus-1D, com dados de potencial mátrico no tempo adquiridos em experimento tipo perfil instantâneo em Argissolo Amarelo.

Já Freire *et al.* (2018), ao alimentarem o modelo com dados de potencial mátrico obtidos por tensiometria, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital, concluíram que, independente do sistema de leitura, o Hydrus-1D estima bem os parâmetros da equação de van Genuchten e, por consequência, o potencial mátrico da água no solo.

Costa (2019), ao estimar os parâmetros da equação de van Genuchten com o Hydrus-1D, a partir de dados de umidade gravimétrica, em solos de textura areia-franca, franco-argilo-arenosa, argilo-arenosa, franco-argilosa e argila, concluiu que o Hydrus-1D resulta em curvas de água no solo mais coerentes com as condições de campo do que aquelas obtidas em laboratório.

Apesar dos relatos que constam literatura a respeito do bom desempenho do modelo Hydrus-1D na estimativa de parâmetros hidráulicos do solo, alguns autores, como Feltrin, Paiva e Paiva (2014) e Silva Júnior *et al.* (2013) salientam que ainda existe a necessidade de avaliação mais refinada do desempenho do modelo para as condições brasileiras.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Trabalhos de campo

O experimento foi realizado no campus do Pici, Universidade Federal do Ceará (UFC), em Fortaleza/CE (547216,76 L; 9586129,55 N - UTM 24S), em corpo de prova com solo da classe textural areia-franca e areia (Tabela 1).

Tabela 1. Granulometria do corpo de prova.

Camada	g kg ⁻¹			Classe textural
	Areia	Silte	Argila	
0 – 0,25 m	841	75	84	Areia franca
0,25 – 0,50 m	914	36	50	Areia

Foi utilizado o método do perfil instantâneo, em quatro parcelas experimentais com dimensões de 1,5 m x 2,0 m (3,0 m²) e dreno a 0,5 m de profundidade. O volume de solo foi delimitado lateralmente por paredes de alvenaria para evitar fluxos laterais subsuperficiais (HILLEL *et al.*, 1972). Em cada parcela experimental foi instalado um tubo de acesso à sonda de capacitância e, no entorno do tubo, distando 0,3 m, tensiômetros com manômetro de mercúrio nas profundidades de 0,2 e 0,4 m (Figura 2).

Figura 2. Vista aérea das parcelas experimentais no campo.



Após o procedimento de instalação do tubo de acesso e dos tensiômetros, cada coluna de solo foi umedecida até a condição de saturação. Atingida a saturação, foi colocada uma lona plástica sobre a parcela experimental para evitar fluxo de água pela superfície, seja por evaporação ou infiltração. O tempo zero ($t = 0$) de redistribuição de água no perfil foi considerado como sendo o momento em que a lâmina de água drenou por completo da superfície do solo.

Após as leituras com a sonda de capacitância (para obter a umidade à base de volume, θ) e dos tensiômetros (para obter o potencial mátrico, ϕ_m) em $t = 0$, as leituras foram feitas nos tempos de 0,17; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; e 7 h e, a partir de então, a cada 24 horas, até a drenagem praticamente cessar, isto é, quando a taxa de variação da umidade com a variação de tempo ($\partial\theta/\partial t$), considerando o método gravimétrico, foi igual a $0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$. Tal valor é condizente com as taxas de drenagem elencadas no trabalho de Chaves (2017). Ao fim do experimento, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada.

Concomitante às leituras com a sonda de capacitância e dos tensiômetros, foi feita a coleta de amostra de solo com trado de rosca, nas profundidades de 0,2 e 0,4 m, distando o ponto de coleta entre 0,15 e 0,20 m dos tensiômetros. A densidade do solo, cuja coleta de amostras se deu em quatro repetições, cada uma próxima a cada tubo de acesso/tensiômetros, foi obtida utilizando o amostrador tipo Uhland e cilindros metálicos com dimensões de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro.

A calibração da sonda de capacitância (Modelo Diviner 2000) foi realizada conforme a equação (6) e a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi obtida conforme a equação (7). As equações médias de calibração para as profundidades de 0,20 e 0,40 m foram, respectivamente, $\theta = 0,5451FR^{3,2274}$ ($r^2 = 0,9912$) e $\theta = 0,6107FR^{4,8545}$ ($r^2 = 0,9919$).

3.2 Trabalhos de laboratório

3.2.1 Densidade do solo

Foi determinada, para cada parcela e profundidade, em amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros de volume de 100 cm^3 , e secas a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ até massa constante (BLAKE; HARTGE, 1986a).

3.2.2 Densidade das partículas

Foi obtida, para cada parcela e profundidade, pelo método do balão volumétrico, cujo princípio é determinar o volume de álcool utilizado para completar um balão volumétrico de 50 mL que contenha 20 g de terra fina seca em estufa. O volume das partículas é igual à diferença entre o volume do balão e o volume de álcool gasto (BLAKE; HARTGE, 1986b).

3.2.3 Porosidade

Foi calculada considerando a densidade do solo e de partículas, pela equação (13)

$$PT = 1 - (\rho_s/\rho_p), \quad (13)$$

sendo PT a porosidade total em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, ρ_p e ρ_s as densidades de partículas e do solo (kg m^{-3}), respectivamente. Os microporos (com diâmetro $< 50 \mu\text{m}$) foram determinados mediante a aplicação de tensão de 6 kPa no funil Haines, até que a água que ocupe os poros com diâmetro igual ou superior a $50 \mu\text{m}$ fosse drenada (DANIELSON; SUTHERLAND, 1986). Os macroporos (com diâmetro $\geq 50 \mu\text{m}$) foram determinados pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.2.5 Curva de água no solo

Foi determinada, para cada parcela e profundidade, em amostras com estrutura preservada. No procedimento, o conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade do solo. Para os pontos de baixa tensões (0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1 m) o funil de Haines foi utilizado para estabelecer o equilíbrio entre a tensão aplicada e o conteúdo de água no solo; para os demais pontos (3,3; 10, 70 e 150 m), o equilíbrio foi obtido em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986).

3.3 Obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten

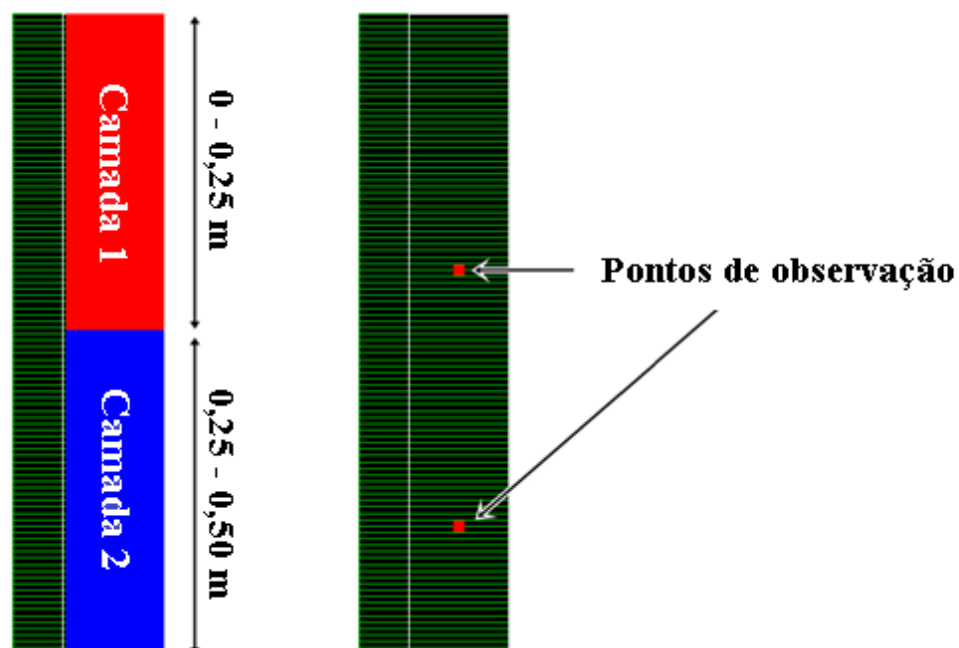
Obtidos os dados experimentais de umidade do solo em laboratório em todos os potenciais mátricos, foi realizado o ajuste dos dados ao modelo matemático proposto por van Genuchten (1980), Equação 1. Os dados foram ajustados utilizando o programa SWRC (*Soil*

Water Retention Curve), seguindo o método iterativo de Newton-Raphson, com a dependência do parâmetro m com o n (DOURADO NETO *et al.*, 2001).

O segundo procedimento se deu por modelagem inversa com dados de potenciais mátricos obtidos por tensiometria e de umidade (volumétrica – θ) obtidos por sonda de capacitância e por gravimetria. Dentre os inúmeros modelos disponíveis para descrever as propriedades hidráulicas do solo, utilizou-se o de van Genuchten (1980) para descrever a CAS. Com as informações de potencial mátrico e de umidade no tempo no experimento de perfil instantâneo, e com o uso do Hydrus-1D, foram obtidos por modelagem inversa quatro parâmetros da equação de van Genuchten (θ_s , θ_r , α e n) e os potenciais mátricos e umidade ajustados para cada tempo de leitura. Considerou-se a dependência entre os parâmetros m e n , isto é, $m = 1 - (1/n)$ (MUALÉN, 1976).

No cenário do modelo Hydrus-1D, o perfil do corpo de prova foi dividido em duas camadas, de acordo com os dados de análise granulométrica e em 101 nós (Figura 3). Cada nó é uma subdivisão do perfil alvo de uma iteração, ou seja, de um ciclo de otimização de dados, e aparece em verde na Figura 3. Foram considerados dois pontos de observações: 0,2 e 0,4 m, correspondentes às profundidades de instalação dos tensiômetros, das leituras com a sonda de capacitância ou profundidades de coleta das amostras para a obtenção da umidade por gravimetria.

Figura 3. Perfil do corpo de prova no cenário do modelo Hydrus-1D



Como valores iniciais para os parâmetros hidráulicos foram atribuídos $\theta_r = 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $\theta_s = 0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $\alpha = 1 \text{ m}^{-1}$; $n = 1,5$; $K_0 = 0,001 \text{ m h}^{-1}$ e $l = 0,5$ em ambas as profundidades. Outra condição de contorno considerada foi fluxo zero na superfície do solo (limite superior) e drenagem livre em 0,5 m (limite inferior). A condição inicial de cada profundidade foi configurada com um potencial matricial de 0,01 m, ou seja, condição de solo praticamente saturado para a modelagem com dados de tensiometria; nos demais casos, com a estimativa feita com dados de umidade, a condição inicial foi a umidade na saturação.

Os parâmetros hidráulicos foram obtidos pela minimização da função objetiva, definido como a soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e simulados (HOPMANS *et al.*, 2002). A função objetiva foi minimizada utilizando o método de Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963).

3.4 Análise estatística dos dados

A análise estatística dos dados foi realizada considerando o delineamento inteiramente casualizado 4 x 4 (quatro procedimentos de obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten: com os dados experimentais em laboratório, por modelagem inversa com os dados de potenciais mátricos obtidos por tensiometria e com os dados de umidade obtidos por sonda de capacitância e por gravimetria; e quatro repetições). As camadas foram comparadas separadamente. Foi aplicado o teste de Jarque-bera para avaliação da normalidade ($p = 0,05$). Para a comparação de médias foi aplicado o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em adição, foram plotadas as curvas ajustadas de umidade versus tempo para confrontar as leituras de umidade gravimétrica de campo com as simuladas pelo Hydrus-1D, considerando os quatro procedimentos de obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten. A performance do modelo foi averiguada pelos seguintes índices: coeficiente de eficiência – E (NASH; SUTCLIFFE, 1970), equação 14, e raiz quadrática do erro médio – RMSE, equação 15.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}, \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}}, \quad (15)$$

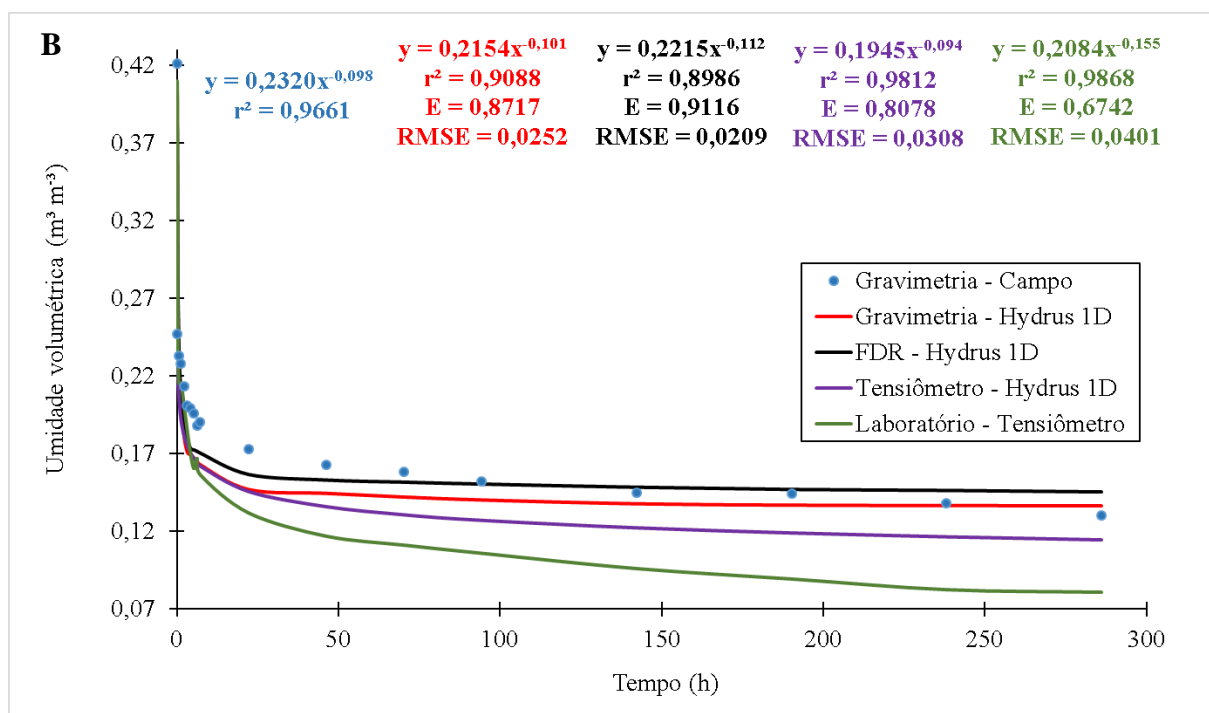
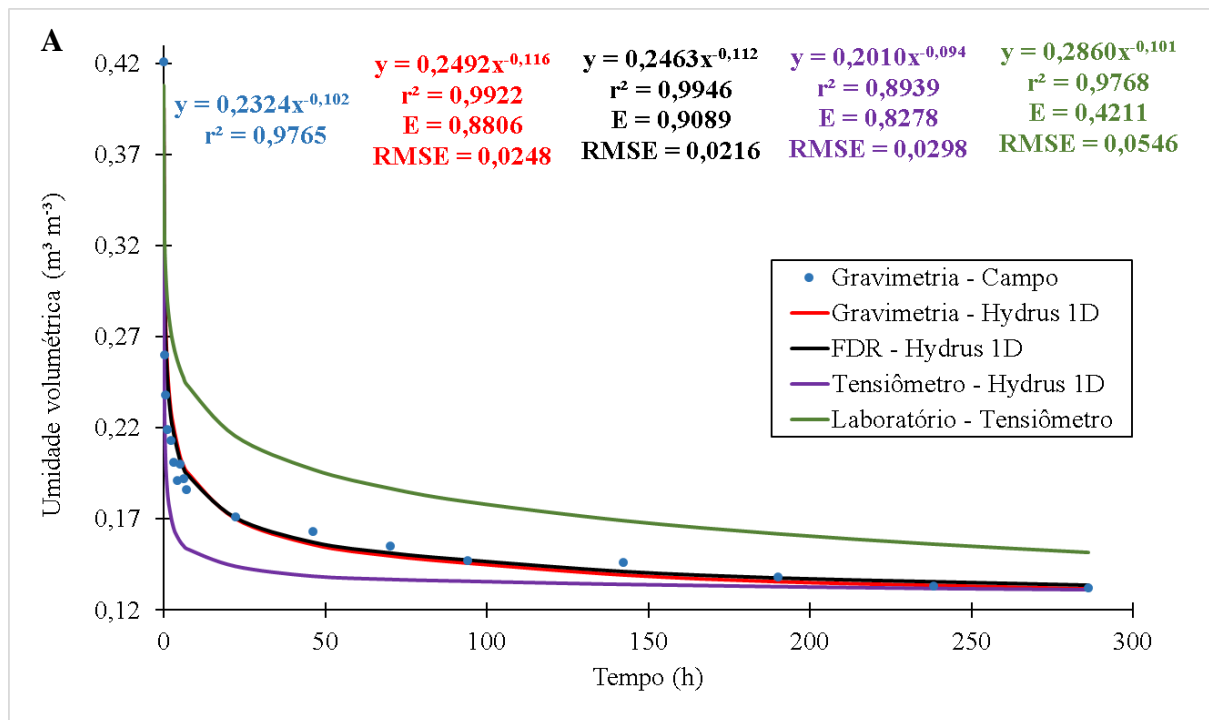
em que O_i corresponde aos dados de umidade gravimétrica obtidos em campo e P_i aos dados de umidade obtidos pela modelagem das curvas de água no solo; n é o número de observações e \bar{O} a média dos valores obtidos em campo.

Segundo Machado *et al.* (2003) o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (E) pode variar desde o infinito negativo até 1, sendo a unidade o indicativo da maior similaridade entre os conjuntos de dados (ASCE, 1993). Já o RMSE é utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos, apresentando os valores do erro na mesma unidade da medida da variável analisada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se nas Figuras 4A e 4B a variação da umidade com o tempo em todos os cenários considerados neste trabalho, para as profundidades de 0,20 e 0,40 m. A taxa de drenagem insignificante ($0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$) foi atingida 287 horas após a primeira leitura.

Figura 4. A - Variação da umidade com o tempo para a profundidade de 0,20 m. B- Variação da umidade com o tempo para a profundidade de 0,40 m.



Tanto na Figura 4A quanto em 4B, nota-se que os dados de umidade no tempo simulando o experimento pelo Hydrus-1D com a umidade obtida pelo método gravimétrico e pela sonda FDR possuíram alta concordância com a variação da umidade no tempo verificada em campo, haja visto o alto valor do coeficiente de eficiência E, muito próximo à unidade em ambas as situações citadas.

Para Machado *et al.* (2003), o coeficiente de eficiência E é um dos parâmetros mais eficientes na avaliação do ajuste de modelos hidrológicos, sendo indicador da similaridade entre dados modelados e medidos em campo. Logo, pode-se inferir que, para tais cenários, a modelagem inversa retornou resultados consistentes com a dinâmica da água em campo. Tal assertiva corrobora os resultados encontrados por Costa (2019) que, utilizando o coeficiente de eficiência E, verificou elevada concordância entre a variação da umidade no tempo medida em campo e a modelada pelo Hydrus-1D com a umidade medida pelo método gravimétrico, independente da classe textural do solo.

O diferencial deste trabalho está justamente em atestar que a modelagem de parâmetros hidráulicos do solo com dados de umidade medidos com a sonda FDR é tão eficiente quanto a modelagem com dados obtidos pelo método gravimétrico, além de implicar maior praticidade pois, uma vez a sonda calibrada, é eliminada a necessidade de coletar amostras e o procedimento é, ainda, mais rápido e menos laborioso do que o de obtenção da CAS em laboratório.

As curvas de umidade no tempo, modeladas com a umidade obtida por gravimetria e pela sonda FDR em ambas as profundidades, também apresentaram os menores valores de RMSE, portanto, o erro, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, para tais situações, foi o menor, evidenciando que ambos os métodos resultaram em maior acuraria na avaliação da dinâmica da redistribuição da água em campo.

Para ambas as profundidades, Figura 4A e 4B, a variação da umidade no tempo predita por intermédio da modelagem de dados de tensiometria, embora inferior às modelagens com umidade gravimétrica e obtida por FDR, também apresentou elevada concordância com os dados de umidade de campo, dado o elevado valor do coeficiente de eficiência E. Para as duas profundidades, o pior rendimento foi o da CAS de laboratório com utilização de dados de tensiometria. Freire *et al.* (2018) também encontraram boa similaridade entre a variação da umidade no tempo medida em campo e a simulando o experimento com o Hydrus-1D com dados de tensiometria, em solo com mais de 80% de areia, confirmando a eficiência do processo de modelagem com dados de tensiometria na predição do comportamento hidráulico do solo em campo.

Consta na Tabela 2 a média dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para todos os cenários e profundidades consideradas.

Tabela 2. Médias dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) para as profundidades de 0,2 e 0,4 m.

Profundidade	Parâmetro	Método			Laboratório
		Gravimetria (Hydrus-1D)	Sonda FDR (Hydrus-1D)	Tensiometria (Hydrus-1D)	
0,2 m	θ_r ($m^3 m^{-3}$)	0,086 b	0,082 b	0,124 a	0,077 b
	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	0,400 b	0,400 b	0,408 ab	0,428 a
	α (ϕm^{-1})	4,063 b	3,941 b	5,102 a	4,110 b
	m	0,558 b	0,574 b	0,761 a	0,519 b
	n	2,284 b	2,349 b	4,235 a	2,093 b
0,4 m	θ_r ($m^3 m^{-3}$)	0,128 a	0,138 a	0,100 b	0,034 c
	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	0,407 a	0,412 a	0,415 a	0,421 a
	α (ϕm^{-1})	3,766 b	4,489 ab	5,250 a	5,022 a
	m	0,774 a	0,800 a	0,779 a	0,676 b
	n	4,502 a	5,000 a	4,532 a	3,130 b

Médias seguidas pela mesma letra, nas linhas, não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Costa (2019), em seu trabalho, salientou o fato de que curvas modeladas com o Hydrus-1D utilizando dados de umidade obtidos por gravimetria de fato representam o comportamento hidráulico do solo no campo, em detrimento das curvas obtidas em laboratório. Ao analisar a Tabela 2, é notório que apenas as curvas advindas da modelagem inversa com dados de umidade obtidos com a sonda FDR tiveram seus parâmetros estatisticamente iguais aos das curvas modeladas a partir de dados de umidade gravimétrica, deixando claro que a utilização da sonda FDR e, posterior modelagem dos dados adquiridos, é eficiente na predição da relação entre potencial mátrico e umidade do solo.

Outro fato importante é que, segundo Jorge, Corá e Barbosa (2010), duas curvas de água são iguais, do ponto de vista matemático, quando todos os parâmetros da equação que as descrevem também são iguais. Tal informação é importante do ponto de vista prático, uma vez que tanto a curva modelada com dados de gravimetria quanto a modelada com dados oriundos da sonda FDR orientam de maneira similar o manejo da água em condições de agricultura irrigada.

É importante destacar que os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980), obtidos pela modelagem de dados de tensiometria, não foram, no geral, estatisticamente iguais

à estimativa com dados obtidos por gravimetria. Aqui pode-se inferir que a predição da variação da umidade no tempo e, por consequência, modelagem dos parâmetros da equação de van Genuchten, é mais eficiente quando o modelo é abastecido com dados de umidade propriamente dita, seja ela obtida por gravimetria ou por sonda FDR, uma vez que não é necessário obter tal variação de maneira indireta, como ocorre quando o Hydrus-1D é alimentado com dados de potencial mátrico. Nessa situação, o Hydrus-1D estima a variação do potencial mátrico no tempo e, a conversão para dados de umidade depende da qualidade da CAS gerada durante o processo de modelagem.

Quanto às curvas de laboratório, a própria coleta das amostras em campo já pode implicar erros. Segundo Veiga (2011), a amostragem de solo para fins de análises físicas, como é o caso da obtenção da CAS, deve ser muito bem planejada quanto à sua intensidade, visando garantir a representatividade das condições de campo. Entretanto, uma boa amostragem ainda não garante a total confiabilidade dos resultados obtidos, pois quando uma amostra de solo é retirada do campo e trazida ao laboratório, são impostas condições de contorno distintas daquelas encontradas no campo (BASILE *et al.*, 2003).

Quanto ao parâmetro θ_r , nota-se que a estimativa com o Hydrus-1D, em todos os cenários, resultou na superestimativa da variável em relação aos dados de laboratório. Para Nascimento *et al.* (2018), o Hydrus-1D, por ser alimentado com dados de umidade advindos de experimentos de drenagem livre, como o do caso em apreço, que findam quando o solo atinge uma variação da umidade com o tempo dita como insignificante ($\partial\theta/\partial t = 0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^3 \text{ d}^{-1}$, neste trabalho), tem dificuldades em modelar a parte mais seca da curva, uma vez que é abastecido com dados que vão desde a saturação até a capacidade de campo, ou seja, situação apenas até solo úmido. Os autores ainda inferem que essa assertiva é interessante por abrir possibilidades para novos trabalhos com modelagem inversa que considerem dados advindos de maior faixa de umidade.

Já o parâmetro θ_s foi subestimado nos cenários de modelagem inversa em relação à obtenção da CAS em laboratório. Segundo Alencar (2017) isso ocorre porque, em campo, dificilmente todos os poros do solo são preenchidos com água por ocasião da tentativa de saturação da parcela experimental, diferentemente da condição laboratorial, em que as amostras são saturadas por capilaridade. Ghiberto (1999) descreve que, em campo, obteve valores de umidade na saturação correspondentes a 70–90% da porosidade do solo, corroborando a informação anterior. Assim, afirma-se que a modelagem inversa com o Hydrus-1D é consistente com as condições de campo. Neste trabalho, segundo o modelo Hydrus-1D, a umidade na

saturação para a profundidade de 0,20 m correspondeu a 93–97% da porosidade, e 97–99% da porosidade para a profundidade de 0,40 m.

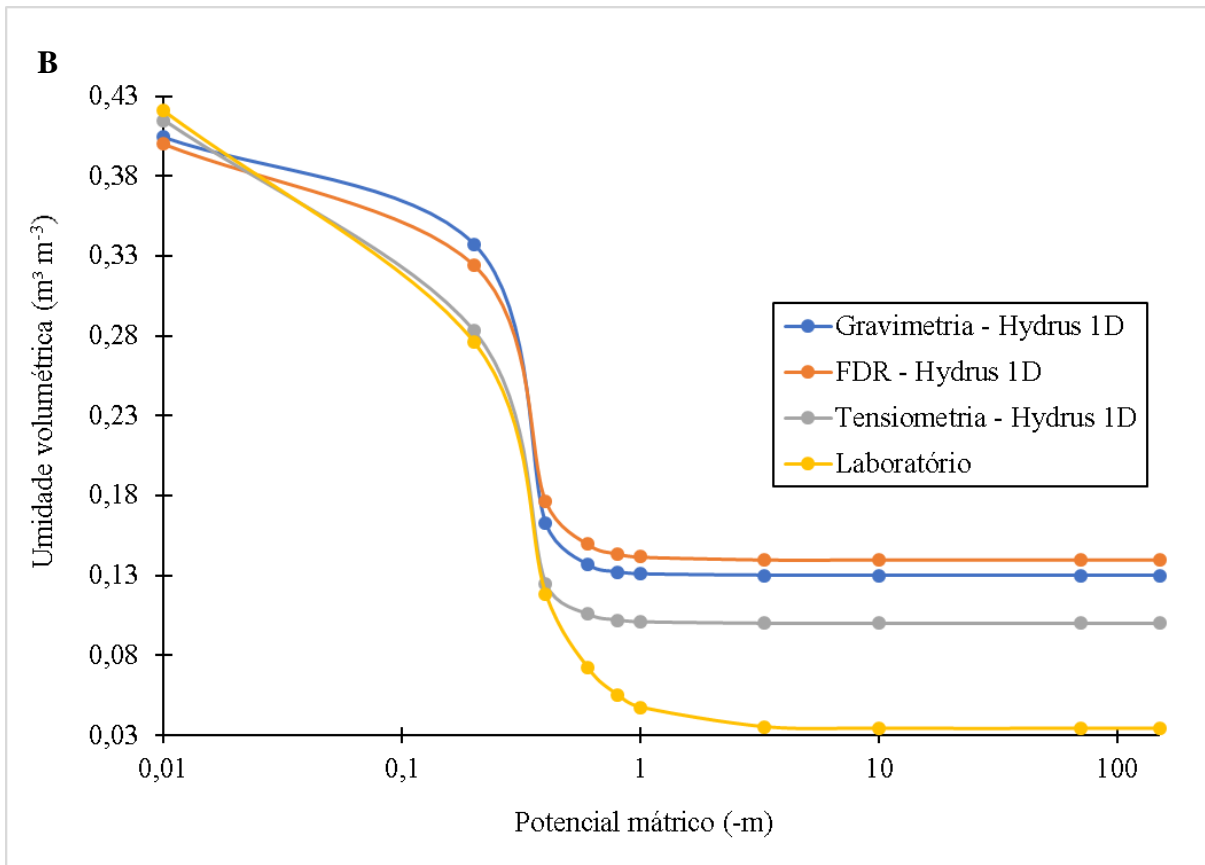
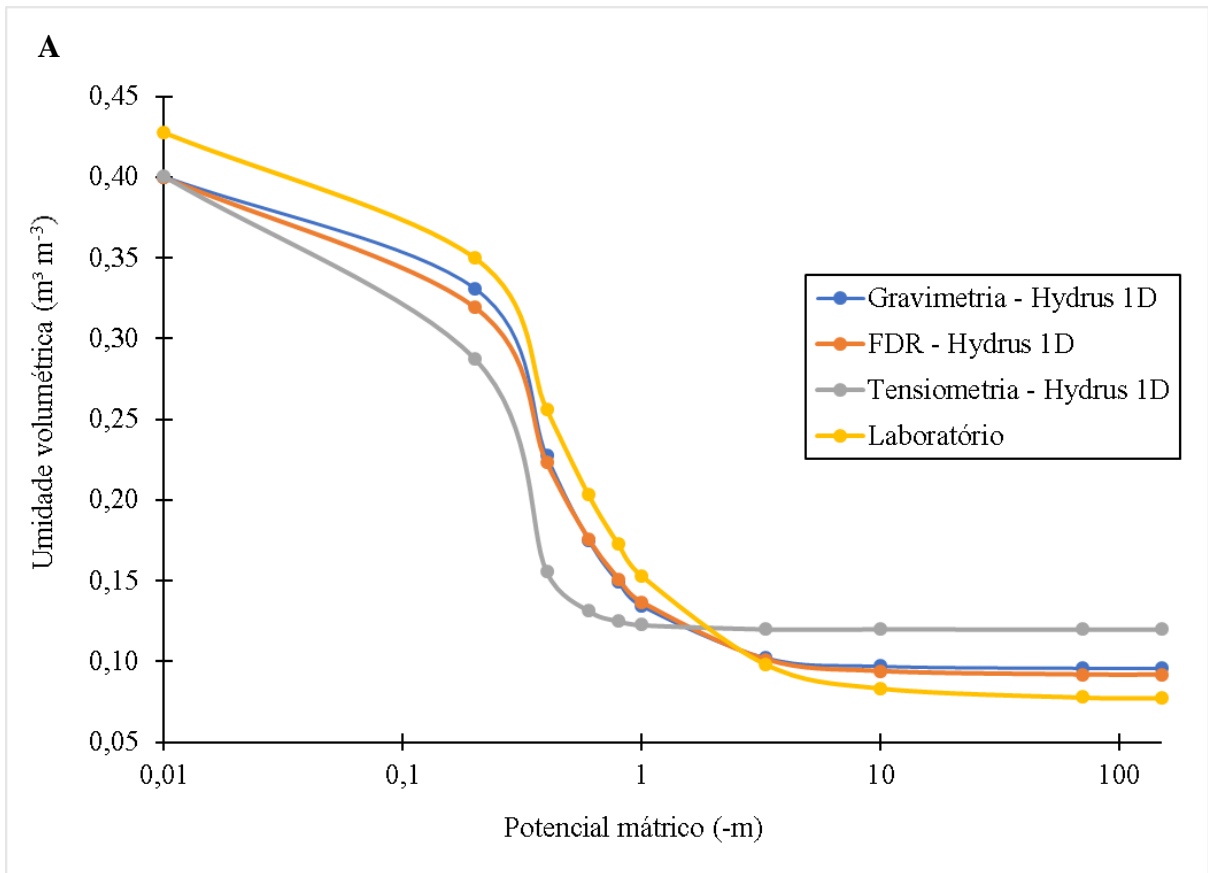
Para o parâmetro α que, segundo Castro *et al.* (2002), corresponde ao inverso da pressão de entrada de ar no solo, apenas a modelagem com dados obtidos com a sonda FDR foi igual a modelagem com dados de umidade obtida gravimetricamente. Portanto, nos dois cenários, a drenagem do solo, antes saturado, inicia em potencial mátrico estatisticamente igual. Já se considerada a visão de van Lier e Pinheiro (2018), que relatam uma mera relação entre o parâmetro e o formato da curva, uma vez que α seria um escalonador do potencial mátrico, ou seja, do eixo das abcissas, ambas as curvas são similares no que diz respeito à sua forma.

O parâmetro n , por ser relacionado à inclinação da CAS, pode ser interpretado como um índice de distribuição de poros por tamanho (VAN GENUCHTEN, 1980). Assim, nas curvas modeladas com dados de umidade obtidos pelo método gravimétrico e sonda FDR, em ambas as profundidades, tem-se equivalente distribuição de poros. A estimativa é, ainda, coerente, uma vez que, com o predomínio de macroporos em solos com maior proporção de areia, a tendência é que os valores de n se distanciem da unidade dada a maior inclinação da CAS (Figuras 5A e 5B), especialmente na faixa de umidade que vai desde o potencial mátrico de entrada de ar no solo ($\phi_m = 1/\alpha$) até -0,6 m, devido ao rápido esvaziamento de tais poros.

Dada a sua relação com a porosidade do solo, variações no parâmetro n também implicam mudanças em variáveis relacionadas ao ponto de inflexão da CAS (ALENCAR, 2017), como é o caso da capacidade de campo que, segundo Dexter e Bird (2001), é definida por esse ponto. A igualdade estatística para parâmetro m , também relacionado ao formato da curva, reforça a similaridade entre as CAS modeladas com dados de gravimetria e sonda FDR.

Como já foi discutido anteriormente e, novamente visualiza-se nas Figuras 5A e 5B, as curvas modeladas com o Hydrus-1D tendem a subestimar a umidade na saturação, já que, dificilmente, todos os poros do solo são preenchidos por água durante o processo de saturação do solo no campo. Já na parte mais seca da curva, especialmente no potencial mátrico de -150 m, a modelagem com o Hydrus-1D superestimou o valor de umidade em relação ao procedimento analítico laboratorial, especialmente porque o modelo foi alimentado com dados que englobaram faixa de umidade que foi desde a saturação até a capacidade de campo. Entretanto, como no manejo da irrigação utiliza-se, especialmente, a parte mais úmida da CAS, não há empecilho algum na utilização das curvas modeladas com o Hydrus-1D para tal fim (NASCIMENTO *et al.* 2018).

Figura 5. A – Curvas de água no solo para a profundidade de 0,20 m. B – Curvas de água no solo para a profundidade de 0,40 m.



No caso deste trabalho, recomenda-se a utilização das curvas advindas da modelagem com dados de umidade obtidas pelo método gravimétrico e pela sonda FDR. No caso da sonda FDR, tem-se o bônus da maior praticidade devido a eliminação da necessidade de coletar amostras em campo e, ainda, se tem economia de tempo, já que o procedimento laboratorial do método gravimétrico pressupõe a secagem das amostras em estufa até massa constante, o que usualmente leva em torno de 24 horas.

A necessidade de calibração da sonda FDR pode ser tomada como desvantagem. Entretanto, uma vez que o equipamento seja bem calibrado, é notória a sua precisão na aquisição de dados de umidade do solo em campo. Dessa forma, a utilização do Hydrus-1D com dados de umidade obtidos com sonda FDR é bastante prática e concisa, retornando bons resultados e facilitando o processo de obtenção da CAS.

Embora alguns autores, como Feltrin, Paiva e Paiva (2014) e Silva Júnior *et al.* (2013) tenham relatado a necessidade da averiguação do desempenho do Hydrus-1D na modelagem de parâmetros hidráulicos do solo, ficou evidente a robustez do modelo para tal fim.

5 CONCLUSÕES

A parametrização da equação de van Genuchten por modelagem inversa com o Hydrus-1D, utilizando dados de umidade obtida por gravimetria e por sonda FDR, resulta em curvas de distribuição de água no solo coerentes com as condições de campo.

A utilização do Hydrus-1D com dados de umidade obtidos com sonda FDR é bastante prática e concisa, retornando bons resultados e facilitando o processo de obtenção da CAS.

REFERÊNCIAS

- ASCE. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management, Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 119, p. 429-442, 1993.
- ASCHONITIS, V.G.; ANTONOPOULOS, V.Z.; LEKAKIS, E.H.; KOTSOPOULOS, S.A.; KARAMOUZIS, D.N. Estimation of field capacity for aggregated soils using changes of the water retention curve under the effects of compaction. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 64, n. 5, p. 688-698, 2013.
- ALENCAR, T.L. **Uma abordagem teórico-metodológica da capacidade de campo**. 2017. 75 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- ALMEIDA, E.L.; TEIXEIRA, A.S.; SILVA, F.C.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; LEÃO, R.A.O. Filter paper method for the determination of the soil water retention curve. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1344-1352, 2015.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. **Física do Solo: Conceitos e aplicações**. 1. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária – Universidade Federal do Ceará. 2008. 290 p.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SILVA, C.R.; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 4, p. 303-307, 2007.
- BASILE, A.; CIOLLARO, G.; COPPOLA, A. Hysteresis in soil water characteristics as a key to interpreting comparisons of laboratory and field measured hydraulic properties. **Water Resources Research**, Washington, v. 39, p. 13.1-13.12, 2003.
- BAUMHARDT, R.L.; LASCANO, R.J.; EVETT, S.R. Soil material, temperature and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 1940-1946, 2000.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986a. cap. 14, p. 377-382.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986b. cap. 13, p. 363-375.
- BORGES, P.A.P.; PAROLIN, S.R. Análise da precisão de um sensor térmico para medir o teor de água do solo. *In*: Congresso nacional de matemática aplicada e computacional, 29, 2016, Campinas. **Anais...** Campinas: IMECC; SBMAC; UNICAMP, 2006.
- BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. Washington: USDA, 1907. 61 p.

- BUSKE, T.C. **Comportamento da umidade do solo determinada por métodos expeditos** 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- BUSKE, T.C.; ROBAINA, A.D.; PEITER, M.X.; TORRES, R.R.; ROSSO, R.B.; BRAGA, F. D.V.A. Determinação da umidade do solo por diferentes fontes de aquecimento. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 315-324, 2014.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013, 686 p.
- CARVALHO, R.E.; SILVA, A.P.M.A. Capacitor cilíndrico excêntrico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 290-295, 2002.
- CASTRO, L.G; MAIA, A.H.N.; VAN LIER, Q.J. Erros na estimativa de umidades pelo modelo de van Genuchten. *In*: Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água, 14, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Agrisus, 2002.
- CHAVES, A.F. **Validação de um método de laboratório alternativo à estimativa da capacidade de campo *in situ***. 2017. 65 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- COELHO FILHO, MAURICIO A.; BASSOI, L.H.; ANGELOCCI, L.R.; COELHO, EUGÊNIO F.; PEREIRA, F.A.C. Relação solo-planta-atmosfera. *In*: SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F., PINTO, J.M.; COELHO FILHO, M.A., ed. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. 1. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. cap 1, p. 27-90.
- COELHO, S.L.; TEIXEIRA, A.S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 536-554, 2004.
- COSTA, T.G.A. **Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten com dados de umidade do solo e modelagem inversa com Hydrus-1D**. 2019. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.D.S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva característica de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 515-523, 2008.
- DALMAGO, G.A.; CUNHA, G.R.; GOUVÊA, J.A.; BRUGNERA, L.; GREGOSKI, C. Respostas da canola à disponibilidade de água no solo. *In*: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 20; Simpósio de mudanças climáticas e desertificação do semiárido brasileiro, 5, 2017, Juazeiro, Petrolina. **Anais...** Juazeiro: UNIVASF; Petrolina: Embrapa Semiárido, 2017.
- DANE, J.H.; HRUSKA, S. In-Situ determination of soil hydraulic properties during drainage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 4, p. 619, 1983.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. cap. 18, p. 443–461.

DEXTER, A.R.; BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, p. 203-212, 2001.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten Soil Water Retention Curve, SWRC (versão 3.0 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

DUARTE, S.N.; SILVA, E.F.F.; MIRANDA, J.H.; MEDEIROS, J.F.; COSTA, R.N.T.; GHEYI, H.R. **Fundamentos de drenagem agrícola**. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 2015. 356 p.

DURIGON, A.; VAN LIER, Q.J. Determinação das propriedades hidráulicas do solo utilizando tensiômetros de polímeros em experimentos de evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1271-1276, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2013. 353 p.

ENGL, H.W., HANKE, M.; NEUBAUER, A. **Regularization of inverse problems: mathematics and its applications**. 1. ed. Dordrecht: Springer, 1996, 322 p.

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

FELTRIN, R.M.; PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. Dinâmica da água no solo simulada pelo modelo HYDRUS-1D e medida a campo para as condições climáticas do Sul do Brasil. *In*: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 11, Maputo, 2013. **Anais...** Maputo: APRH, 2013. v. 1. p. 1-12.

FREIRE, A.G. **Estimativa de parâmetros hidráulicos do solo utilizando tensiometria com alguns sistemas de leitura**. 2016. 52 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

FREIRE, A.G.; ALENCAR, T.L.; CHAVES, A.F.; NASCIMENTO, Í.V.; ASSIS JÚNIOR, R.N., VAN LIER, Q.J.; MOTA, J.C.A. Comparison of devices for measuring soil matric potential and effects on soil hydraulic functions and related parameters. **Agricultural Water Management**, [S.I.], v. 209, p. 134-141, 2018.

FRENZEL JUNIOR, L.E. **Eletrônica moderna – Fundamentos, dispositivos, circuitos e sistemas**. 1. Ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 840 p.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. cap. 15, p. 383-411.

GHIBERTO, P.J. **Metodologias para a obtenção de parâmetros utilizados em modelos de infiltração da água no solo**. 1999. 79Fp. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GHIBERTO, P.J.; MORAES, S.O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1177-1188, 2011.

GONÇALVES, A.D.M.A.; LIBARDI, P.L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37 p. 1174-1184, 2013.

GROVES S.J.L; ROSE S.C.L. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. **Soil Use and Management**, [S.I.], v. 20, n. 1, p. 96-97, 2004.

HASANOĞLU, A.H.; ROMANOV, V. G. **Introduction to inverse problems for differential equations**. 1. ed. Cham: Springer, 2017, 261 p.

HIDALGO, J.; PASTOR, M.; HIDALGO, J.C. Evaluación de una sonda FDR para la estimación del contenido de água em el solo para el control de riegos em Olivar. **Estudios de la Zona no Saturada del Suelo**, [S.I.], v. 6, p. 171-176, 2003.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STILIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, Philadelphia, v. 114, p. 395-400, 1972.

HOPMANS, J.W.; ŠIMŮNEK, J.; ROMANO, N.; DURNER, W. Inverse modeling of transient water flow. In: DANE, J. H.; TOPP, G., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 4 - Physical Methods**. 3. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 2002. Cap 3.6.2, p. 963-1008.

HURTADO, A.L.B., CICHOTA, R.; VAN LIER, Q.J. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 301-307, 2005.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; GHIBERTO, P.J.; TORMENA, C.A.; PILATTI, M.A.; LIBARDI, P. L. Physical quality indicators and mechanical behavior of agricultural soils of Argentina. **PLoS ONE**, [S.I.], v. 11, n. 4, 2016.

JORGE, R.F.; CORÁ, J.E.; BARBOSA, J.C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um Latossolo Vermelho Eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1831-1840, 2010.

- KANDELOUS, M.M.; MORADI, B.A.; HOPMANS, J.W. An alternative tensiometer design for deep vadose zone monitoring. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 79, n. 5, p. 1293-1296, 2015.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. cap. 26, p. 635-662.
- LEPSCH, I.F. **19 lições de Pedologia**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011, 456 p.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 3.ed. São Paulo: EDUSP, 2018. 352 p.
- LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 1, p. 3, 1980.
- LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.M.; KOIDE, S.; SANTOS, R.M. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de Latossolos do cerrado em condições de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 23-32, 2012.
- LIU, H.H. **Fluid flow in the subsurface: history, generalization and applications of physical laws**. 28. ed. Gewerbestrasse: Springer, 2017. 230 p.
- LUCAS, J.F.R.; TAVARES, M.H.F.; CARDOSO, D.L.; CÁSSARO, F.A.M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1957-1973, 2011.
- MACHADO, R.E.; VETORAZZI, C.A. XAVIER, A.C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 727-33, 2003.
- MARQUARDT, D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, Philadelphia, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.
- MENEZES, A.S.; ALENCAR, T.L.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; TOMA, R.S.; ROMERO, R.E.; COSTA, M.C.G.; COOPER, M.; MOTA, J. C. A. Functionality of the porous network of Bt horizons of soils with and without cohesive character. **Geoderma**, Amsterdam, v. 313, n. 1, p. 290-297, 2018.
- MONTEIRO, A.L.; REISSER JÚNIOR, C.; ROMANO, L.R.; TIMM, L.C; LEMOS, G.S. **Desempenho de uma sonda de Capacitância e de sensores Watermark® com base na umidade gravimétrica em um Argissolo Bruno-Acinzentado**. *In*: Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 35, 2015, Natal. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2015.
- MORGAN, K.T.; PARSONS, L.R.; WHEATON, T.A.; PITTS, D.J.; OBREZA, T.A. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 987-989, 1999.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NASCIMENTO, I.V. **Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten em laboratório e por modelagem inversa com Hydrus-1D**. 2017. 47 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

NASCIMENTO, I.V.; ALENCAR, T.L.; QUEIROZ, A.S.; MOTA, J.C.A. Erros decorrentes do uso de métodos na estimativa da condutividade hidráulica em solo saturado. In: Encontro de pós-graduação e pesquisa, 27, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Universidade de Fortaleza, 2017.

NASCIMENTO, Í.V.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; ARAÚJO, J.C.; ALENCAR, T.L.; FREIRE, A.G.; LOBATO, M.G.R.; SILVA, C.P.; MOTA, J.C.A.; NASCIMENTO, C.D.V. Estimation of van Genuchten equation parameters in laboratory and through inverse modeling with Hydrus-1D. **Journal of Agricultural Science**, Ontario, v. 10, n. 3, 2018.

OR, D. Who invented the tensiometer? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 1–3, 2001.

PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1576-1585, 1997.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: Edur, 2004. 190 p.

PINHO, R.E.C.; MIRANDA, J.H. Avaliação do modelo HYDRUS-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, 2014.

POLYAKOV, V.; FARES, A.; RYDER, M.H. Calibration of capacitance system for measuring water soil content of tropical soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 4, n. 4, p. 1004-1010, 2005.

PREVEDELLO, C.L.; REICHARDT, K., CORDEIRO, D.G.; MELO, E.F.R.Q.; SCHEFFER, M. Gradiente unitário do potencial hidráulico como fonte de erro na obtenção da condutividade hidráulica em solo não-saturado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 2, p. 275-280, 1994.

REICHARDT, K; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole. 2012, 524 p.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids in porous mediums. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 1, p. 318– 333, 1931.

RICHARDS, L.A.; FIREMAN, M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 56, p. 395-404, 1943.

SANTOS, C.R. Uso de tensiômetro na irrigação do coqueiro. **Embrapa Semiárido - Comunicado Técnico**, 2001.

SANTOS, R.M. **Calibração de sensores FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) para estimativa da umidade do solo**. 2005. 53 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias - Área de Concentração: Uso, Manejo e Conservação dos Recursos Naturais Água e Solo) - Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 2005.

SENTEK. **Diviner 2000: user guide version 1.4**. Stepney: Sentek Pty Ltd, 2007.

SILVA, C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUSA, A.B.; Melo, F.B.; COELHO FILHO, M.A. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 636-640, 2007.

SILVA, C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SOUZA, C.F. **Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem**. In: II Workshop de Aplicações de Técnicas Eletromagnéticas para o Monitoramento Ambiental. Taubaté-SP, 2008. Disponível em: <http://www.cpamn.embrapa.br/soloaguaclima/doc/Aderson/CLs/CL1.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2017.

SILVA JÚNIOR, J.J. **Aplicação do método inverso pelo modelo HYDRUS-2D para obtenção de propriedades hídricas de solos tropicais**. 2015. Tese (Doutorado em Recursos hídricos em sistemas agrícolas – Engenharia de água e solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

SILVA JÚNIOR, J.J.; COLOMBO, A.; SILVA, E.L. SCALCO, M.S. Determinação da condutividade hidráulica do solo utilizando o problema inverso do software HYDRUS-1D. **Agro@ambiente**, Boa Vista, v. 7, n. 2, p. 242-251, 2013.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.; ŠEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 15, n. 7, 2016.

SOARES, G.H.; FERNANDES, A.L.T. Utilização da tensiometria no manejo da irrigação na cultura da cenoura irrigada por pivô central. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 18, p.2976-2988, 2014.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 63-68, 2002.

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

TEIXEIRA, C.F.A.; MORAES, S.O.; SIMONETE, M. A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, 2005.

VAN DAM, J.C.; STRICKER, J.N.M.; DROOGERS, P. Inverse method for determining soil hydraulic functions from one-step outflow experiments. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1042, 1992.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-897, 1980.

VAN LIER, Q.J. Análise de sensibilidade no processamento de dados de experimentos de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 869-883, 2002.

VAN LIER, Q.J.; PINHEIRO, E.A.R. An alert regarding a common misinterpretation of the van Genuchten α parameter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, 2018.

VEIGA. **Metodologia para coleta de amostras e análises físicas do solo**. Florianópolis: Epagri - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. 2011. 52 p.

XIANG-WEI, H.; MING-NA, S.; HORTON, R. **Estimating van Genuchten model parameters of undisturbed soils using an integral method**. Soil Science Society of China, Nanjing, n. 20, 2010, p. 55-62.

WANG, L.; LI, X.G.; GUAN, Z.H.; JIA, B.; TURNER, N.C.; LI, F.M. The effects of plastic-film mulch on the grain yield and root biomass of maize vary with cultivar in a cold semiarid environment. **Field Crops Research**, [S.I.], v. 216, p. 89-99, 2018.

WATSON, K.K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, Washington, v. 2, p. 709-715, 1966.