



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

TANCIO GUTIER AILAN COSTA

**ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN COM
DADOS DE UMIDADE DO SOLO E MODELAGEM INVERSA COM HYDRUS-1D**

FORTALEZA

2019

TANCIO GUTIER AILAN COSTA

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN COM
DADOS DE UMIDADE DO SOLO E MODELAGEM INVERSA COM HYDRUS-1D

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de Concentração: Manejo de Solo e 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)

- C876e Costa, Tancio Gutier Ailan.
Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten com dados de umidade do solo e modelagem inversa com Hydrus-1D / Tancio Gutier Ailan Costa. – 2019.
52 f.
- 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 característica de água no solo. 2. Perfil instantâneo. 3. Parâmetros hidráulicos do solo. I. Título.
CDD 631.4
-

TANCIO GUTIER AILAN COSTA

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN COM
DADOS DE UMIDADE DO SOLO E MODELAGEM INVERSA COM HYDRUS-1D

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo. Área de Concentração: Manejo de Solo e Água.

Aprovada em: 15/02/2019.

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)

Dr. Alcione Guimarães Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus e à minha mãe Edineuza Azevedo Costa por todo apoio, incentivo e amor dado a mim. À minha grandiosa amiga Bruna Iwata, por sempre me incentivar a buscar o conhecimento da melhor forma possível. E a todos meus amigos que vivem a me apoiar e se fazem presentes.

Dedico e ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me guiar no melhor caminho e pelo apoio constante ao longo dessa jornada.

À minha mãe por todo amor que somente o papel maternal é capaz de prover e a toda minha família na figura de avós, tios e primos que sempre apoiaram meus estudos.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela excelente orientação, incentivo e apoio durante todo o curso.

Ao Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pelas valiosas sugestões ao estudo e os bons ensinamentos durante o curso.

Aos colegas Thiago Leite de Alencar e Ícaro Vasconcelos pelo auxílio durante o manuseio do Hydrus-1D e demais apoios durante o trabalho.

Aos professores do Departamento de Ciência do Solo, pelos ensinamentos transmitidos em suas disciplinas.

Aos colegas do Departamento de Ciência do Solo pela convivência e troca de conhecimentos ao longo desse período.

Aos meus amigos de curso e da vida Juliana Coelho, Thaís Martins, Gilcivan Moreira, Wesley Souza, Ana Carla, Ericka Paloma, João Marcos e André Nogueira pelo acolhimento, sincera amizade e por tornar a luta diária menos exaustiva e mais prazerosa.

A todos vocês o meu Muito Obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"A natureza é sábia e justa. O vento sacode as árvores, move os galhos, para que todas as folhas tenham o seu momento de ver o sol".

(Humberto de Campos)

RESUMO

A relação entre o teor de água e a energia com a qual ela está retida no solo pode ser expressa graficamente constituindo a curva característica de água no solo (CCAS). Tradicionalmente sua obtenção se dá em laboratório, com o ajuste dos dados por diversos modelos, sendo o de van Genuchten (1980) um dos mais utilizados. Apesar de rotineira, a obtenção da CCAS em laboratório requer muito tempo e, por isso, tem-se buscado maneiras para a otimização do tempo possível com menor dispêndio de trabalho, desde que se mantenha a boa qualidade dos dados. Com esse propósito insere-se a modelagem, e consequentemente o modelo Hydrus-1D, como possibilidade da obtenção da referida curva. Neste caso, considerou-se a hipótese de que com a modelagem inversa utilizando-se do Hydrus-1D é possível simular a redistribuição de água no solo coerente ao processo verificado no campo e estimar com melhor acurácia a CCAS com dados de umidade do solo obtidos em campo do que com aqueles obtidos em laboratório. Assim, objetivou-se estimar os parâmetros da equação de van Genuchten em cinco classes texturais de solo com amostras de solo em laboratório e por modelagem inversa com dados de umidade (obtidos por gravimetria) em experimentos de campo tipo perfil instantâneo. Em todos os casos a estimativa dos parâmetros se deu com cinco repetições. Os parâmetros da equação de van Genuchten foram submetidos à análise de variância (teste F a 5% de significância), com a comparação de médias pelo teste de Tukey, também a 5% de significância. A eficiência na predição e acurácia dos resultados simulados foi medida pelo coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe – COE, e pela raiz quadrática do erro médio – RMSE. A modelagem inversa simulou satisfatoriamente a redistribuição de água no solo para todas as classes texturais, dado os baixos valores de erros dos dados e a boa concordância entre os observados em campo e os simulados. Além disso, as curvas características de água no solo obtida em laboratório superestimaram aquelas obtidas pelo modelo inverso, tornando os resultados obtidos pelo Hydrus-1D mais fiel a representação da dinâmica da água em condições de campo. Concluiu-se então, que o uso do Hydrus-1D permite estimar os parâmetros da equação de van Genuchten de modo mais coerente com os dados obtidos *in situ* que aqueles obtidos em laboratório para todas as classes texturais, estimando com melhor acurácia o conteúdo de água no solo independentemente da classe textural de solo.

Palavras-chave: Curva característica de água no solo. Perfil instantâneo. Parâmetros hidráulicos do solo.

ABSTRACT

The relationship between the water content and the energy with which it is retained in the soil can be expressed graphically constituting the soil water characteristic curve (SWCC). Traditionally it is obtained in the laboratory, with the adjustment of the data by several models, being van Genuchten (1980) one of the most used. Although routinely, obtaining the SWCC in the laboratory requires a lot of time and, therefore, we have been looking for ways to optimize the time possible with less labor expenditure, as long as good data quality is maintained. For this purpose, the modeling, and consequently the Hydrus-1D model, is inserted as the possibility of obtaining the said curve. In this case, the hypothesis was considered that with the reverse modeling using Hydrus-1D it is possible to simulate the coherent soil water redistribution to the process verified in the field and to estimate with better accuracy the SWCC with soil moisture data obtained in the field than those obtained in the laboratory. The objective of this study was to estimate the parameters of the van Genuchten equation in five soil texture classes with soil samples in the laboratory and by inverse modeling with moisture data (obtained by gravimetry) in field experiments. In all cases, the estimation of the parameters occurred with five replications. The parameters of the van Genuchten equation were submitted to analysis of variance (F test at 5% significance), with Tukey's test, also at 5% significance. The efficiency in the prediction and accuracy of the simulated results was measured by the Nash and Sutcliffe - COE efficiency coefficient, and by the root mean squared root - RMSE. Reverse modeling simulated satisfactorily the redistribution of water in the soil for all textural classes, given the low error values of the data and the good agreement between those observed in the field and the simulated ones. In addition, the soil water characteristic curves obtained in the laboratory overestimated those obtained by the inverse model, making the results obtained by Hydrus - 1D more faithful to the representation of water dynamics under field conditions. It was concluded that the use of Hydrus-1D allows to estimate the parameters of the van Genuchten equation in a way more coherent with the data obtained in situ than those obtained in the laboratory for all textural classes, estimating with better accuracy the water content in the soil independently of the textural class of soil.

Keywords: Characteristic curve of water in the soil. Instantaneous profile. Hydraulic parameters of the soil.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Condições de contorno iniciais estabelecidas para os perfis de solo considerado..... | 26 |
|---|----|

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 - Umidade média no tempo, medida in situ e ajustada pelo Hydrus-1D, para as classes texturais areia-franca (A), franco-argilo-arenosa (B), argilo-arenosa (C), franco-argilosa (D) e argila (E). 30
- Gráfico 2 - Curvas características de água do solo obtidas por modelagem inversa com o Hydrus – 1D e em laboratório para as classes texturais areia-franca (A), franco-argilo-arenosa (B), argilo-arenosa (C), franco-argilosa (D) e argila (E). 31

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Aplicação do uso do Hydrus – 1D por alguns pesquisadores do mundo..... | 23 |
| Tabela 2 - Caracterização granulométrica e classe textural dos solos estudados..... | 24 |
| Tabela 3 - Parâmetros hidráulicos médios de entrada para simulação no Hydrus-1D..... | 27 |
| Tabela 4 - Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para a curva característica de água no solo média obtida com base em dados de campo por modelagem inversa com Hydrus-1D e em laboratório para as classes texturais analisadas..... | 34 |
| Tabela 5 - Umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e capacidade de água disponível (CAD) obtida com base em dados de campo por modelagem inversa com Hydrus-1D e em laboratório para as classes texturais analisadas..... | 36 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 17 |
| 2.1 | A curva característica de água no solo..... | 17 |
| 2.2 | Métodos para a estimativa da umidade e do potencial mátrico do solo..... | 18 |
| 2.3 | Modelagem inversa e o modelo Hydrus-1D | 20 |
| 2.4 | Aplicação prática do modelo Hydrus-1D..... | 22 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| 3.1 | Caracterização da área experimental..... | 24 |
| 3.2 | Atributos avaliados nos solos em laboratório | 24 |
| 3.2.1 | <i>Granulometria</i> | 24 |
| 3.2.2 | <i>Curva característica de água no solo</i> | 24 |
| 3.3 | Procedimento experimental no campo: Perfil instantâneo..... | 25 |
| 3.4 | Tratamentos | 26 |
| 3.4.1 | <i>Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten com os dados de laboratório</i> | 26 |
| 3.4.2 | <i>Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten com base na modelagem inversa</i> | 27 |
| 3.4.3 | <i>Estimativa dos conteúdos de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível</i> | 28 |
| 3.5 | Análise estatística dos dados..... | 28 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 29 |
| 5 | CONCLUSÃO | 38 |
| | REFERÊNCIAS | 39 |
| | APÊNDICE A – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE NA SATURAÇÃO EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS | 47 |
| | APÊNDICE B – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE RESIDUAL EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS | 48 |
| | APÊNDICE C – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA ALFA EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS | 49 |
| | APÊNDICE D – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA n EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS | 50 |
| | APÊNDICE E – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE NA CAPACIDADE DE CAMPO EM CONDIÇÃO DE | |

| | |
|---|-----------|
| CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS | 51 |
| APÊNDICE F – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE NO PONTO DE MURCHA PERMANENTE EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS | 52 |
| APÊNDICE G – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE NA CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS | 53 |
| APÊNDICE H - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO NO HYDRUS 1D..... | 54 |

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de utilização da água na irrigação tem despertado a necessidade do uso racional deste recurso, visando principalmente que a sua aplicação seja realizada em tempo oportuno e em corretas quantidades. No entanto, para que se possa realizar uma quantificação precisa do fornecimento de água para as plantas é fundamental o conhecimento da relação funcional existente entre a umidade e o potencial mátrico especialmente em condições que forneçam informações do comportamento da água na rizosfera. Essa relação funcional entre o teor de água e a energia com a qual ela está retida no solo pode ser expressa graficamente, sendo conhecida como curva característica de água no solo (CCAS).

A CCAS tem sido utilizada no entendimento da dinâmica da água no solo em vários estudos, especialmente aqueles que priorizam as relações solo-água-plantas, além de ser vista como um indicador da qualidade física do solo, considerando que modificações estruturais no solo alteram o seu formato, razão pela qual é considerada uma propriedade físico-hídrica do solo.

Existem diversos métodos experimentais para determinação da CCAS, cada um com suas especificidades, vantagens e limitações, sendo a escolha do número e da combinação de pontos a serem levantados para o traçado da curva normalmente feita de forma arbitrária. Ademais, em muitos casos a sua determinação é lenta e onerosa.

A sua determinação pode ser realizada tanto em campo quanto em laboratório, entretanto, tradicionalmente a obtenção da curva se dá em laboratório pelo uso de equipamentos conhecidos como funil de Haines e câmara de pressão de Richards. Porém, o uso específico e o elevado custo de aquisição dos equipamentos, principalmente da câmara de Richards, restringe sua utilização, sem contar as dificuldades operacionais e a necessidade de um longo período de tempo para obtenção dos parâmetros da CCAS. Por estas razões, a busca por métodos alternativos é uma constante, principalmente por aqueles financeiramente mais acessíveis e com período de tempo reduzido. Assim, por questões práticas, encontram-se na literatura sugestões de vários métodos que podem ser utilizados como alternativa aos extratores de Richards, como é o caso do uso de outros instrumentos, redução do número de tensões ou mesmo funções de pedotransferência.

Neste contexto, destaca-se que atualmente o uso de funções de pedotransferência tem sido útil na obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo por método indireto, o qual tende a garantir mais agilidade no processo de obtenção da CCAS. Assim, possibilita-se o uso da

modelagem inversa, que consiste no método de obtenção de uma determinada variável pela solução inversa de um problema matemático. Este método é uma forma alternativa de se obter os parâmetros hidráulicos do solo, que apesar de não ser recente, sua implementação computacional e sua aplicação em diversos campos da ciência é mais atual.

Com isso, um dos modelos mais usados para obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo por meio da solução inversa de um problema é o Hydrus-1D, no qual se insere como dados de entrada a evolução da umidade ou do potencial mátrico no tempo e se obtém a base para simulação e obtenção dos parâmetros necessários para construção da CCAS.

Desta maneira, considerou-se a hipótese de que com a modelagem inversa com o Hydrus-1D é possível simular a redistribuição de água no solo coerente ao processo verificado no campo e estimar com melhor acurácia os parâmetros da equação de van Genuchten com os dados de umidade obtidos em campo do que com aqueles obtidos em laboratório.

Assim, objetivou-se estimar os parâmetros da equação de van Genuchten em cinco classes texturais de solo com amostras de solo em laboratório e por modelagem inversa com dados de umidade (obtidos por gravimetria) em experimentos de campo tipo perfil instantâneo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A curva característica de água no solo

A curva característica de água no solo (CCAS) vem sendo utilizada como uma ferramenta considerável na descrição do comportamento físico-hídrico e na mecânica dos solos não saturados (LUCAS *et al.*, 2011), passando a ser um instrumento fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo (CICHOTA; JONG VAN LIER, 2004). Tal curva corresponde à representação gráfica da relação entre potencial mátrico do solo (ϕ_m) e o teor de água à base de volume (θ), ou o grau de saturação do solo, necessários para definir as condições que potencialmente podem provocar o processo de fluxo em um meio poroso não saturado (LEE, 2011).

O processo de retenção de água na matriz do solo é governado pelas forças capilares e de adsorção que atuam nela, denominadas de forças matriciais, o que dá origem ao termo potencial mátrico da água no solo (VIEIRA, 2006). Em condições próximas à saturação do solo, essas forças capilares são importantes na determinação do ϕ_m e a curva passa a depender do arranjo estrutural do solo. Entretanto, conforme a água passa a ser drenada no solo, os potenciais menores vão sendo obtidos e a força matricial passa a não depender dos processos geométricos do solo (REICHARDT; TIMM, 2012).

A determinação da CCAS é crucial em estudos que envolvem a dinâmica da água e solutos, manejo da irrigação e a qualidade do solo (VIEIRA; CASTRO, 1987; DEXTER, 2004; MACHADO; TORMENA, 2008), visto que a partir dela é possível a obtenção de parâmetros como a capacidade de campo (FERREIRA; MARCOS, 1983), a capacidade de água disponível (ARRUDA; ZULLO; OLIVEIRA, 1987), a distribuição de poros por tamanho (OLIVEIRA *et al.*, 2004) e o índice S (DEXTER, 2004).

A CCAS pode ser determinada por vários métodos, divididos entre os de campo e os de laboratório. Os métodos de laboratório referem-se aos que fazem uso de câmaras de pressão de Richards (RICHARDS, 1941; RICHARDS; FIREMAN, 1943) e funis de Haines e de mesas de tensão, para valores de baixa tensão (JAMISON; KROTH, 1958). Os métodos de campo fazem o uso de tensiômetros (PERROUX *et al.*, 1982; LANGNER *et al.*, 1998) que fornecem diretamente os valores do ϕ_m . Apesar da possibilidade de determinação da CCAS em campo, a obtenção em laboratório tem sido muito mais frequente, sendo o funil de Haines e a câmara de pressão de Richards o aparato mais utilizado (RICHARDS; FIREMAN, 1943).

Essa relação físico-hídrica entre o conteúdo de água e a energia com a qual está retida no solo pode ser expressa por modelos matemáticos (CICHOTA; JONG VAN LIER, 2004), ligados a equações empíricas com obtenção dos parâmetros da CCAS por ajuste não linear. Embora existam vários modelos empíricos listados na literatura, o modelo de van Genuchten (1980) é o mais utilizado (DEXTER *et al.*, 2008; TORMENA *et al.*, 2008) em função do seu alto poder de predição (LEIJ; RUSSELL; LESCH, 1997).

2.2 Métodos para a estimativa da umidade e do potencial mátrico do solo

O movimento da água no solo é um dos assuntos que vem sendo abordado em grande escala na física do solo, devido sobretudo a sua importância quanto à disponibilidade de água para as plantas e ao transporte de solutos (FONTES *et al.*, 2010), e seu estudo se faz por meio de operações ligadas a determinação do conteúdo de água presente no solo e a energia com a qual ela está retida nesse meio poroso (CÁSSARO *et al.*, 2008).

Para estudos que envolvem o movimento de água no solo existem diferentes métodos listados na literatura, os quais podem ser utilizados para se determinar tanto o conteúdo de água do solo quanto a sua energia de retenção, sendo que todos apresentam suas vantagens e limitações (BERALDO, 2011) e o conhecimento destas é de fundamental importância para escolha do método a ser empregado nos estudos.

As pesquisas voltadas para a medição da umidade do solo, normalmente envolvem métodos que são classificados como diretos ou indiretos (SILVA, 2013). O método gravimétrico por exemplo, é considerado um método direto e classificado como padrão, especificamente por ser mais preciso, exato, e permitir diretamente a obtenção da umidade do solo (BERALDO, 2011). No entanto, apresenta como limitação ser demorado, destrutivo e não permitir a repetição da amostragem no mesmo local, principalmente quando comparado com outros métodos indiretos (GILBERTO JÚNIOR, 2003), dificultando a sua aplicação nos casos em que o conhecimento da umidade do solo é exigido com maior frequência.

Miranda (2007) ressalta que em decorrência de tais limitações identificadas no método gravimétrico, normalmente se utilizam métodos indiretos na medição da umidade do solo, tendo em vista que ela é estimada com a medição de alguma propriedade do solo a ela relacionada. Por sua vez, métodos indiretos também são classificados em dois grupos: os tensiométricos e volumétricos (BENEDÍ; MUÑOZ-CARPENA, 2005) e sua utilização depende da escolha do pesquisador e das condições de contorno de cada estudo.

Conforme Benedí e Muñoz-Carpena (2005) os métodos tensiométricos consideram o uso do tensiômetro. Os volumétricos incluem a reflectometria no domínio do tempo – TDR, reflectometria no domínio da frequência – FDR, reflectometria no domínio da amplitude – ADR, transmissão de fase e transmissão no domínio do tempo – TDT, além da utilização de técnicas nucleares (moderação de nêutrons e atenuação de raios gama) e tomografia computadorizada (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008).

O uso destes métodos é válido tanto para obtenção do volume de água no solo quanto para o seu potencial mátrico, embora para este último caso, o tensiômetro seja o equipamento mais utilizado para sua determinação em campo. Isso deve-se ao fato de ser um equipamento simples, barato, não sendo afetado pela salinidade do solo, e podendo então ser utilizado tanto em área de produção como para fins de pesquisa (SILVA, 2013). A sua grande vantagem está no fato de ser um método não destrutivo, de rápida mensuração e de possibilitar a repetição da medida em um mesmo local (BERALDO, 2011), além de também possibilitar quantificar o conteúdo de água no solo.

Em geral, existem vários tipos de tensiômetros disponíveis no mercado, variando desde os mais sofisticados, que possibilitam leituras automáticas do potencial mátrico no solo, até mesmo os mais simples com leituras diretas, como os tensiômetros com vacuômetro e monômetro de mercúrio (BRAGA; CALGARO, 2010). Entre estes, usualmente utilizam-se os tensiômetros com monômetro de mercúrio por ser um sistema considerado mais sensível, exato e permitir uma leitura direta, o que faz com que seja tomado como padrão para aferição de outros modelos (FREIRE, 2016). Entretanto, apesar de fornecer valores mais apurados da tensão, o mesmo encontra-se em fase de desuso pela dificuldade na aquisição e uso do mercúrio, principalmente por se tratar de um metal de alto risco de contaminação ambiental e humana.

O problema da utilização de produtos e equipamentos que fazem uso do mercúrio teve grande repercussão mundial após a realização da Convenção de Minamata, a qual passou a exigir o abandono do seu comércio em vários países, incluindo o Brasil, elencado como um dos países signatários da convenção (FREIRE, 2016). Com isso, recentemente foi sancionado no Brasil o decreto legislativo nº 99, de 2017, que aprova o acordo internacional sobre o desuso do mercúrio (BRASIL, 2017), o que inclui o controle de suas fontes e a sua comercialização, o que acaba por tornar a utilização dos tensiômetros de mercúrio mais restrita.

Além dos tensiômetros, outros instrumentos têm sido utilizados para determinação do potencial mátrico do solo, entre os quais destacam-se o uso da câmara de Richards, o funil de Haines e a mesa de tensão (RICHARDS, 1941; RICHARDS; FIREMAN, 1943). Tais

instrumentos são frequentemente usados em condições de laboratório, e comumente listados na literatura como metodologias clássicas para a determinação do potencial mátrico. Porém, apesar de bem difundidos, apresentam limitações capazes de induzir a redução da sua utilização, principalmente em função do alto custo de aquisição dos equipamentos e do seu árduo trabalho de execução.

2.3 Modelagem inversa e o modelo Hydrus-1D

A determinação dos parâmetros hidráulicos do solo é importante em estudos com modelagem do fluxo de água, transporte de solutos ou contaminantes bem como em simulação de crescimento vegetal (SCARPARE *et al.*, 2011), e a sua correta determinação depende sobretudo da adequada caracterização das funções hidráulicas do solo. Quando realizada por estimativa de parâmetros, permite considerável liberdade na escolha das condições de contorno experimentais, além de possibilitar a utilização das medidas obtidas em experimentos como dados de entrada (KOOL *et al.*, 1985).

Em algumas soluções de problemas de movimento de água no solo faz-se o uso de dados de medições de campo para inferir valores de parâmetros dos modelos que descrevem o processo (BECK; WOODBURY, 1998), sendo este método denominado de solução ou mesmo modelagem inversa. Este método corresponde a uma forma alternativa de obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo (FREIRE, 2016), que embora não seja recente, sua implementação computacional e sua aplicação em diversos campos da ciência apresentam forte expressão na atualidade (SILVA JÚNIOR, 2015).

Para a possível utilização da modelagem inversa é necessário que o sistema ao qual se quer aplicar o método seja representado matematicamente por meio de funções parametrizadas, e que se tenha alguns valores experimentais do sistema (SILVA JÚNIOR, 2015). Assim, nestas condições os parâmetros hidráulicos são preditos indiretamente de variáveis facilmente medidas, como a umidade e o potencial mátrico do solo a partir da otimização e estimação dos parâmetros do modelo (DIKINYA, 2005).

Conforme Campos Velho (2001), a solução de um problema pelo método inverso corresponde a se determinar causas em função dos seus efeitos, fato contrário aos modelos diretos, em que a solução é baseada em encontrar os efeitos em função de suas causas. O método supõe, a priori, que o modelo aplicado e suas relações hidráulicas selecionadas sejam a descrição exata do comportamento físico do solo, e que o erro do modelo é insignificante. Isso

implica dizer que os erros entre o simulado e o observado são causados apenas por inexatidão distribuída nas medidas (SILVA JÚNIOR, 2015).

A princípio, a utilização da modelagem inversa em estudos do solo apresentava foco específico no transporte de solutos (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN, 1996); passando posteriormente a ser aplicado nas estimativas das funções hidráulicas de solos não saturados. Além disso, embora tenha sido aplicado inicialmente em experimentos de laboratório, o método inverso pode ser igualmente aplicável a dados de campo (KOOL; PARKER, 1988).

Em condições de laboratório, van Dam *et al.* (1992), Eching e Hopmans (1993) e Zurmuhl e Durner (1998), foram os primeiros pesquisadores a utilizar a modelagem inversa em experimentos de escoamento, objetivando determinar os parâmetros hidráulicos dos solos em estudo. Já em campo, a primeira aplicação foi reportada por Dane e Hruska (1983), que otimizaram os parâmetros da equação de van Genuchten com dados de drenagem, seguido por Kool *et al.* (1987) em estudo de fluxo de água em lisímetro, e por Romano (1993) na tentativa de quantificar a variabilidade especial dos parâmetros hidráulicos do solo.

Nos últimos quarenta anos notou-se um avanço significativo no processo de modelagem matemática do movimento de água e solutos no solo (JANKOSZ, 2008), com destaque ao uso do modelo Hydrus-1D para a obtenção de parâmetros hidráulicos do solo por meio de soluções inversas (FREIRE, 2016).

O Hydrus-1D é um software com modelo matemático usado para o cálculo do movimento unidimensional de água, calor e soluto através do solo (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013). O mesmo é constituído pelo programa computacional Hydrus e de uma interface gráfica que interage com o usuário, Hydrus-1D (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013). Em sua interface gráfica são inseridos valores medidos (potencial mátrico ou umidade ao longo do tempo) e, como resultado do processamento, obtém a solução inversa referente à variável desejada, como condutividade hidráulica do solo e parâmetros empíricos da equação de van Genuchten (1980). Além disso, o programa resolve numericamente a equação de Richards para fluxo de água em solo saturado e não-saturado, e equações do tipo convecção-dispersão para transporte de soluto e de calor em meio líquido e gasoso (SILVA, 2010).

Segundo Simunek *et al.* (2013), a grande utilização do Hydrus-1D se dá por ele possuir um grande número de processos nos códigos, além de sua flexibilidade em permitir a aplicação em problemas agrícolas, industriais e ambientais, com a possibilidade de estimar parâmetros de forma inversa com facilidade de uso. Isso inclui a técnica de otimização de parâmetros baseada no método iterativo de Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963) para

estimação inversa dos parâmetros hidráulicos do solo. Essa técnica tornou-se bastante utilizada no meio científico, sendo aplicada tanto em experimentos de laboratório quanto em experimentos de campo.

Além disso, o Hydrus-1D permite o uso de cinco modelos analíticos para descrever as propriedades hidráulicas do solo: i) o modelo de Brooks e Corey (1964), ii) o modelo de Genuchten-Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980; MUALEM, 1976); iii) o modelo de van Genuchten modificado de Vogel e Císlerová (1988); iv) o modelo de Kosugi (1996); e v) o modelo de Durner (1994) que considera a porosidade dual. Para este último modelo, a dupla porosidade refere-se à existência de duas regiões com porosidades distintas e propriedades hidráulicas contrastantes presentes em solos com características estruturais heterogêneas (LEWANDOWSKA *et al.*, 2008). Assim, devido a este comportamento hídrico contrastante entre as diferentes regiões, tais solos não podem ser descritos pelo método clássico de porosidade unimodal (RICHARDS, 1931), mas sim pelo uso de modelos de porosidade bimodal, como o caso do modelo proposto por Durner (1994).

Contudo é importante ressaltar segundo Tucci (1998) que o processo de utilização do modelo é denominado de simulação envolvendo o ajuste ou estimativa, em que se deve ser determinado os parâmetros; a validação pelo processo de verificação da simulação do modelo pelos parâmetros estimados e a previsão que é a simulação do sistema pelo modelo empregado. Assim, apesar da sua grande e importante utilização deve-se ter cuidado no uso do modelo pela sua vasta aplicação no campo prático, visto que a não-linearidade de alguns parâmetros hidráulicos do solo que integram a equação de fluxo de água no solo, cria dificuldades na solução de problemas que envolvam o movimento de água em meio poroso. Deste modo, a grande desvantagem na utilização deste tipo de modelo está na discretização dos processos contínuos e na dificuldade da representação matemática de alguns processos físicos, ligados sobretudo a variabilidade específica do fenômeno em si, do modelo e da estimativa dos parâmetros que o compõe (BIASSUSI, 2001).

2.4 Aplicação prática do modelo Hydrus-1D

Ao longo dos anos, o uso do Hydrus-1D tem sido difundido e aplicado por vários estudiosos no Brasil e no mundo, tanto em estudos ligados ao fluxo de água no solo quanto transporte de soluto e calor (Tabela 1). Conforme Chaves (2009) sua vasta difusão deve-se a sua aplicabilidade na estimativa dos processos de percolação de água e lixiviação de compostos químicos na zona vadosa do solo, particularmente em estudos de recarga e contaminação de

aquíferos e dinâmica da água e solutos tanto em meios não saturados ou parcialmente saturados quanto completamente saturados.

Tabela 1 - Aplicação do uso do Hydrus – 1D por alguns pesquisadores do mundo.

| Autor | País | Aplicação prática | | | Cenário |
|---------------------------|----------|-------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| | | Fluxo de água | Transporte de soluto | Transporte de calor | |
| Fuentes et al. (2008) | Chile | | x | | Agricultura |
| Gonçalves et al. (2006) | Portugal | x | | | Agricultura |
| Meiwirth e Mermoud (2004) | Suíça | | x | | Agricultura |
| Poch et al. (2005) | Espanha | x | | | Agricultura |
| Rojas e Otálvaro (2008) | Colômbia | | x | | Agricultura |
| Watanabe (2008) | Japão | | | x | Solos congelados |
| Sanchez (2003) | EUA | x | x | | Agricultura |
| Souza (2015) | Brasil | x | | | Agricultura |

Fonte: Adaptada de Mota (2010a).

Silva *et al.* (2015) frisam que, de modo geral, o Hydrus-1D vem sendo utilizado com maior frequência em estudos da dinâmica de água e solutos em colunas de solo, com poucos estudos desenvolvidos em condições experimentais de campo. Porém, apesar de ser pouco aplicado em campo, tais estudos têm demonstrado ótimos resultados quanto à simulação do conteúdo e comportamento da água e solutos no solo, como é o caso de Monteiro *et al.* (2009) ao avaliarem a lavagem parcial de sais em Neossolo Flúvico em lote irrigado no município de Pesqueira-PE, Kanzari *et al.* (2012) ao utilizarem o modelo Hydrus-1D para investigar o risco de salinização e a dinâmica de umidade em região semiárida da Tunísia, e Zeng *et al.* (2014) ao aplicarem o modelo na análise de lixiviação de sais em área irrigada na China.

No Brasil, em estudos realizados por Silva Júnior (2015), Alencar (2017) e Nascimento *et al.* (2018) quanto à aplicação do modelo Hydrus na obtenção de propriedades hídricas de solos tropicais em experimentos de campo com dados de potencial mátrico, é possível verificar o bom desempenho do modelo na simulação da retenção de água nos solos pela comparação das curvas características de água no solo entre os dados simulados pelo Hydrus-1D e aqueles obtidos em laboratório. Assim, os autores constaram que as curvas obtidas pelos dois métodos diferem entre si e, aquelas obtidas pelo Hydrus-1D representam mais fielmente a dinâmica da água em condição de campo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

Conforme descrito por Alencar (2017), os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos em experimentos conduzidos no campus do Pici, na Universidade Federal do Ceará (UFC), em Fortaleza-CE, e na Unidade de Pesquisa e Extensão- UEPE, uma das unidades físicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE - Campus Limoeiro do Norte), em Limoeiro do Norte-CE. Os locais foram selecionados em função das classes texturais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 2 - Caracterização granulométrica e classe textural dos solos estudados.

| Solos | Locais | Prof. m | Granulometria | | | Classe textural |
|------------|----------------------|------------|---------------|-------|--------|-----------------------|
| | | | Areia | Silte | Argila | |
| Argissolo | Fortaleza/CE | 0,25 | 843 | 75 | 82 | Areia-franca |
| Cambissolo | Limoeiro do Norte/CE | 0,10 | 558 | 173 | 269 | Franco-argilo-arenosa |
| Cambissolo | Limoeiro do Norte/CE | 0,15 | 492 | 139 | 369 | Argilo-arenosa |
| Cambissolo | Limoeiro do Norte/CE | 0,25 | 377 | 225 | 398 | Franco-argilosa |
| Cambissolo | Limoeiro do Norte/CE | 0,25 | 254 | 167 | 579 | Argila |

Fonte: Alencar (2017).

3.2 Atributos avaliados nos solos em laboratório

3.2.1 *Granulometria*

A fração argila foi quantificada pelo método da pipeta, a fração areia por peneiramento, e silte pela diferença entre o total da amostra de terra fina seca em estufa e o somatório de areia e argila (GEE; BAUDER, 1986). O hidróxido de sódio (NaOH) 1 Mol L⁻¹ foi utilizado para a dispersão química das partículas. Todas as análises foram realizadas com cinco repetições.

3.2.2 *Curva característica de água no solo*

O conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade do solo [$Porosidade\ total = 1 - (densidade\ do\ solo / densidade\ de\ partículas)$]; para os pontos de baixa

tensões (2, 4, 6, 8 e 10 kPa) 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 (33, 100, 700 e 1500 kPa), o equilíbrio foi obtido em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). A determinação foi realizada com cinco repetições.

3.3 Procedimento experimental no campo: Perfil instantâneo

Para cada classe textural de solo foi realizado experimento no campo pelo método do perfil instantâneo, em uma parcela circular com diâmetro de 4 m. Estabelecida a profundidade, o volume de solo foi delimitado nas faces laterais por lona plástica com objetivo de evitar fluxos laterais subsuperficiais. Dessa forma, garantiu-se que o fluxo de água no centro da parcela ocorresse somente na direção vertical (HILLEL *et al.*, 1972).

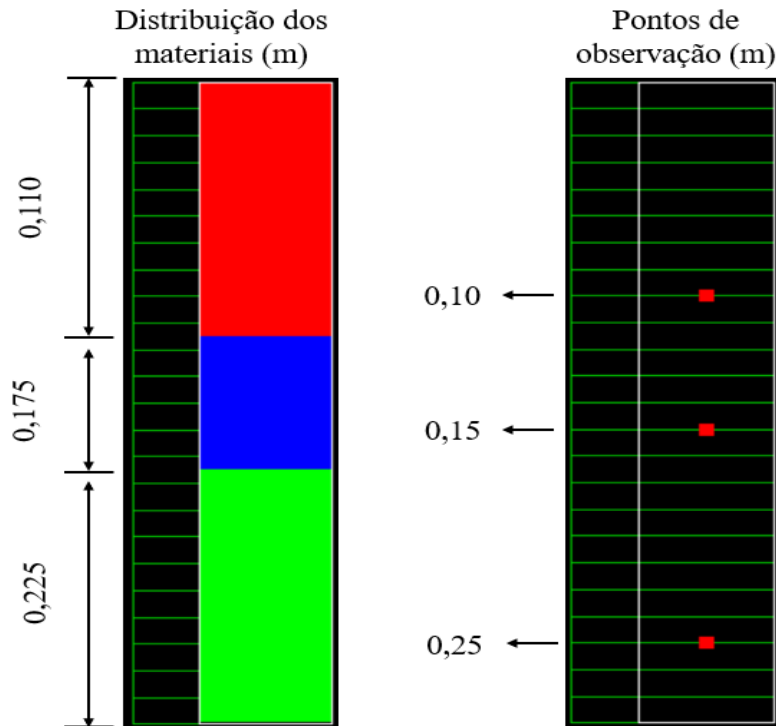
Após o procedimento de preparo da parcela experimental, cada parcela foi umedecida de modo a garantir a saturação do solo. Posteriormente, foi colocada uma lona plástica para evitar qualquer fluxo de água pela superfície, seja por evaporação ou infiltração. O tempo zero ($t = 0$) de redistribuição de água no perfil foi considerado no momento em que a lâmina de água drenou da superfície do solo.

Foram conduzidos três experimentos de perfis instantâneos nas áreas pré-estabelecidas em função da textura do solo. O Argissolo Amarelo (EMBRAPA, 2013) está localizado na UFC – Campus do Pici e corresponde à classe textural areia-franca. A coleta de solo para monitorar a umidade em 0,25 m de profundidade se deu em cinco pontos distribuídos no entorno do centro da parcela (experimento 1). Os Cambissolos Háplicos (EMBRAPA, 2013) estão localizados no IFCE - Campus Limoeiro do Norte e correspondem às classes texturais franco-argilo-arenosa e franco-argilosa (experimento 2) e argilo-arenosa e argila (experimento 3). De igual modo, a coleta de solo para monitorar a umidade se deu em cinco pontos distribuídos no entorno do centro da parcela, em 0,10 e 0,25 m e 0,15 e 0,25 m, respectivamente, nos experimentos dois e três (Figura 1).

Para a classe textural areia-franca as coletas de solo para monitorar a umidade foram feitas nos tempos de 2, 4, 6, 8, 32, 56, 80, 104, 128, 152, 176, 186, 310, 237, 261, 285 e 333 horas, com dezessete coletas ao longo do experimento. Para as classes texturais franco-argilo-arenosa e franco-argilosa as coletas foram feitas nos tempos de 2, 4, 6, 19, 43, 68, 92, 116, 140, 164, 188, 212, 236, 260, 284, 308, 332 e 356 horas, com dezoito coletas ao longo do ensaio experimental. Finalmente, para as classes texturais argilo-arenosa e argila nos tempos de 2, 4, 6, 19, 43, 67, 91, 115, 139, 163, 187, 211, 235, 259, 283 e 307 horas, perfazendo um total de

dezesseis coletas no tempo. Em todos os casos a última coleta foi realizada quando a drenagem praticamente cessou, isto é, quando a taxa de variação da umidade com a variação de tempo, $d\theta/dt$, foi menor ou igual a $0,001 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$. O monitoramento da umidade se deu por coletas de solos utilizando-se trado holandês com determinações pelo método termogravimétrico.

Figura 1 - Condições de contorno iniciais estabelecidas para os perfis de solo considerado.



Fonte: Autor.

3.4 Tratamentos

3.4.1 Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten com os dados de laboratório

Com os dados de umidade obtidos em laboratório para os potenciais mátricos aplicados (CCAS em laboratório) foi realizado o ajuste dos dados de acordo com o modelo matemático de van Genuchten (1980), a partir da equação

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m}, \quad (2)$$

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

curva. Os dados foram ajustados com programa Soil Water Retention Curve – SWRC, versão 3.0 beta (DOURADO NETO *et al.*, 2001). O ajuste dos parâmetros θ_r , θ_s , α , e n se deu com o método iterativo de Newton-Raphson, com dependência do parâmetro m com o n ($m = 1 - 1/n$).

3.4.2 Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten com base na modelagem inversa

Com base nas informações de umidade e tempo nos experimentos 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 a umidade ajustada para o período experimental. Foi considerada a dependência entre os parâmetros m e n , isto é, $m = 1 - 1/n$ (MUALEN, 1976).

A simulação da dinâmica da água utilizando o software Hydrus-1D foi realizada com os parâmetros hidráulicos do solo como entrada (Tabela 3), conforme sugerido por Alencar (2017) baseando-se nos parâmetros fornecidos pelo próprio modelo para cada classe textural, e considerando as seguintes condições de contorno: fluxo nulo na interface solo-atmosfera e drenagem livre para o limite inferior da camada considerada. Para a condição inicial de cada profundidade foi estabelecida uma umidade de solo praticamente saturado. Na sequência foram inseridos os valores de umidade medidos *in situ* no período de 333, 356, 307, 356 e 307 horas nas classes texturais areia-franca, franco-argilo-arenosa, argilo-arenosa, franco-argilosa e argila, respectivamente.

Tabela 3 - Parâmetros hidráulicos médios de entrada para simulação no Hydrus-1D.

| Classe Texturais | Materiais ¹ | Parâmetros | | | | | |
|-----------------------|------------------------|------------|------------|----------|------|--------|-----|
| | | θ_r | θ_s | α | n | K_s | l |
| Areia-franca | 1 | 0,045 | 0,430 | 1,00 | 2,68 | 0,1000 | 0,5 |
| | 2 | 0,065 | 0,410 | 7,50 | 1,89 | 0,0440 | 0,5 |
| Franco-argilo-arenosa | 1 | 0,100 | 0,390 | 5,90 | 1,48 | 0,0300 | 0,5 |
| Argilo-arenosa | 1 | 0,100 | 0,380 | 2,87 | 1,40 | 0,0009 | 0,5 |
| | 2 | 0,068 | 0,380 | 3,00 | 1,09 | 0,0200 | 0,5 |
| Franco-argilosa | 1 | 0,100 | 0,390 | 5,90 | 1,48 | 0,0090 | 0,5 |
| Argila | 1 | 0,100 | 0,380 | 2,87 | 2,00 | 0,7000 | 0,5 |
| | 2 | 0,068 | 0,380 | 0,80 | 1,09 | 0,0020 | 0,5 |

¹Texturas verificadas até a profundidade de 0,4 m; θ_r e θ_s ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação; α é escalonador do ψ_m ; n é um parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva; K_s (cm d^{-1}) é a condutividade hidráulica do solo saturado; e l é um parâmetro de conectividade de poros (MUALEM, 1976). Fonte: Alencar (2017).

3.4.3 Estimativa dos conteúdos de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível

Conhecidas as curvas de água no solo por ambos os procedimentos de obtenção, foram estimadas as umidades na capacidade de campo (potencial mátrico de -10 kPa, conforme SILVA *et al.*, 1994), no ponto de murcha permanente (potencial mátrico de -1500 kPa, conforme SILVA *et al.*, 1994) e calculada a capacidade de água disponível (umidade entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente).

3.5 Análise estatística dos dados

Os dados foram analisados considerando o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 5 (dois procedimentos para obtenção dos parâmetros da curva: placas porosas em laboratório e por modelagem inversa a partir de dados de umidade coletados em campo e cinco classes texturais de solo: areia-franca, franco-argilo-arenosa, argilo-arenosa, franco-argilosa e argila) com cinco repetições. Os parâmetros da equação de van Genuchten (θ_s , θ_r , α e n) bem como os conteúdos de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível, foram submetidos a análises de variância pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Na avaliação estatística do desempenho da modelagem inversa, os dados de umidade volumétrica simulados foram comparados aos observados em condição de campo. Foram utilizados os índices raiz do erro quadrático médio – RMSE e coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe – COE, equações 3 e 4, respectivamente,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{n}}, \quad (3)$$

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E}_s)^2}, \quad (4)$$

em que E_m é a umidade observada; E_s , a umidade simulada pelo modelo; \bar{E}_s , a média da umidade observada no período de simulação; e n , o número de umidades. O índice RMSE é comumente utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos, com a vantagem de apresentar valores do erro na mesma unidade da medida da variável analisada. O coeficiente COE pode variar entre negativo infinito a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste (ASCE, 1993).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

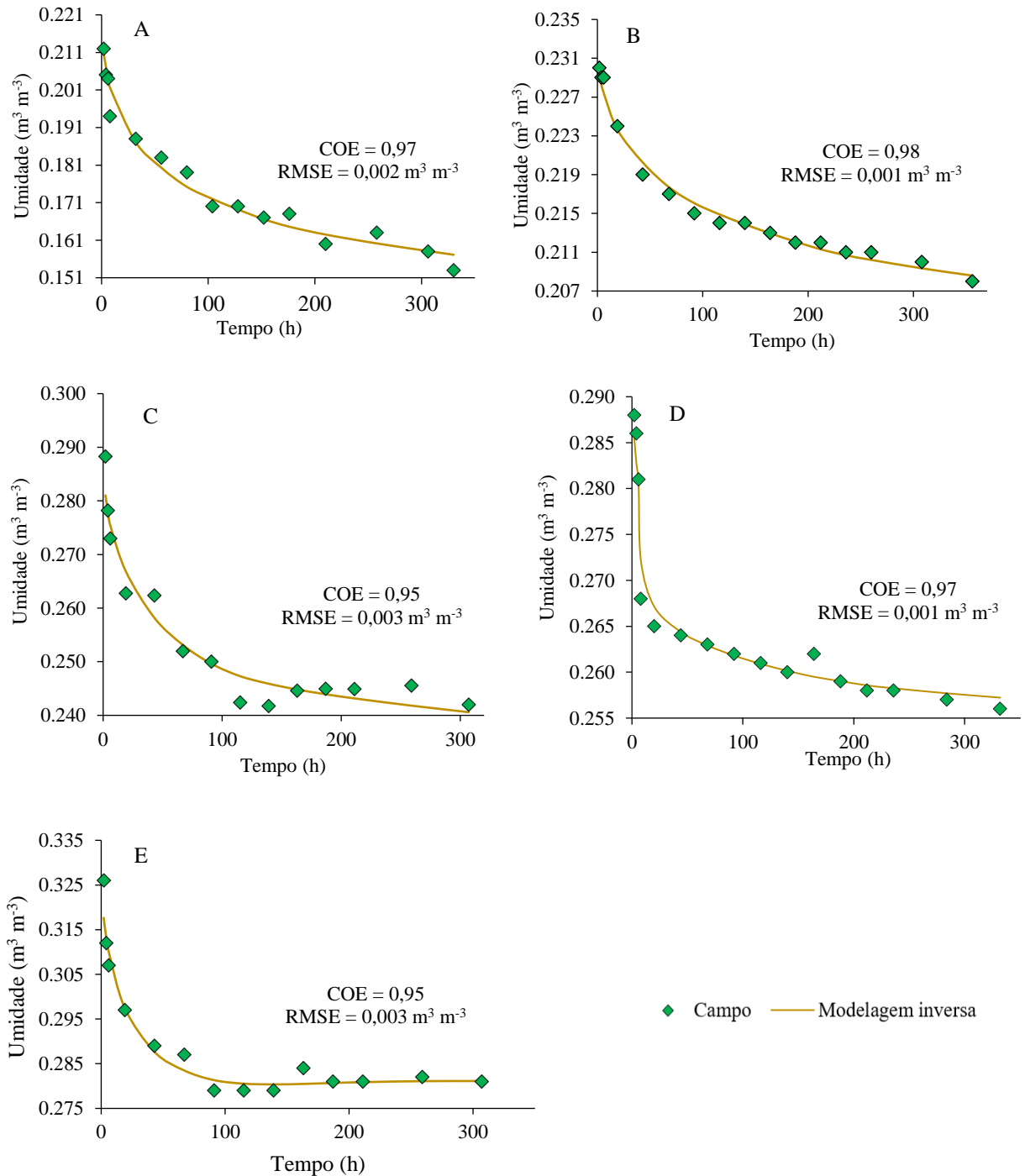
Consta no Gráfico 1 a variação da umidade média no tempo obtida em campo e simulada por modelagem inversa. Pode-se observar que em todas as classes texturais de solo a modelagem inversa simulou bem o processo ocorrido em campo, haja vista serem muito baixos os valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e os valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), denotando boa concordância entre dados observados em campo e os simulados pelo Hydrus – 1D.

Os valores do RMSE próximo de zero evidenciam baixo erro entre os dados observados e os simulados pelo Hydrus-1D, enquanto os valores do COE próximos de 1 realçam o poder preditivo da modelagem inversa na simulação da dinâmica água no solo. Segundo Silva *et al.* (2015), os valores dos índices raiz do erro quadrático médio (RMSE) medem a precisão do modelo, e variam de 0,0 a 1,0, sendo que quanto mais próximo de zero for o valor de RMSE, maior a exatidão de estimativa do modelo. Já os coeficientes de eficiência da modelagem (COE) indicam que o modelo é mais preciso quando os mesmos se aproximam da unidade. Quanto a este último, Zhong e Dutta (2015) afirmam que resultados entre 0,0 e 1,0 são considerados aceitáveis para o desempenho dos modelos, enquanto que valores < 0,0 são indicativos de desempenho inaceitável, indicando baixo poder preditivo do modelo.

Considerando que a comparação gráfica entre os dados observados e os simulados por modelagem inversa mostram uma mesma tendência de variação do conteúdo de água no solo para todas as classes texturais estudadas (Gráfico 1), é possível afirmar que o Hydrus-1D foi capaz de simular muito bem a dinâmica de água no solo ao longo do tempo.

Os resultados obtidos neste estudo vão de acordo aos encontrados por Zeng *et al.* (2014), uma vez que em estudo destinado a avaliar a dinâmica de água no solo sob condições de salinidade e a eficiência do Hydrus-1D na simulação do movimento de água no solo, encontraram boa concordância entre os valores de umidade do solo medida *in situ* e os simulados pelo Hydrus-1D, com coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe variando de 0,49 a 0,92. Já Kanzari *et al.* (2012) objetivando analisar a aplicação prática do Hydrus-1D no movimento de água no solo e a transferência de sais na região semiárida localizada na Tunísia observaram que o modelo Hydrus-1D em função do método inverso foi capaz de simular bem a dinâmica de água com valores de erro quadrático médio (RMSE) em cerca de $0.43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

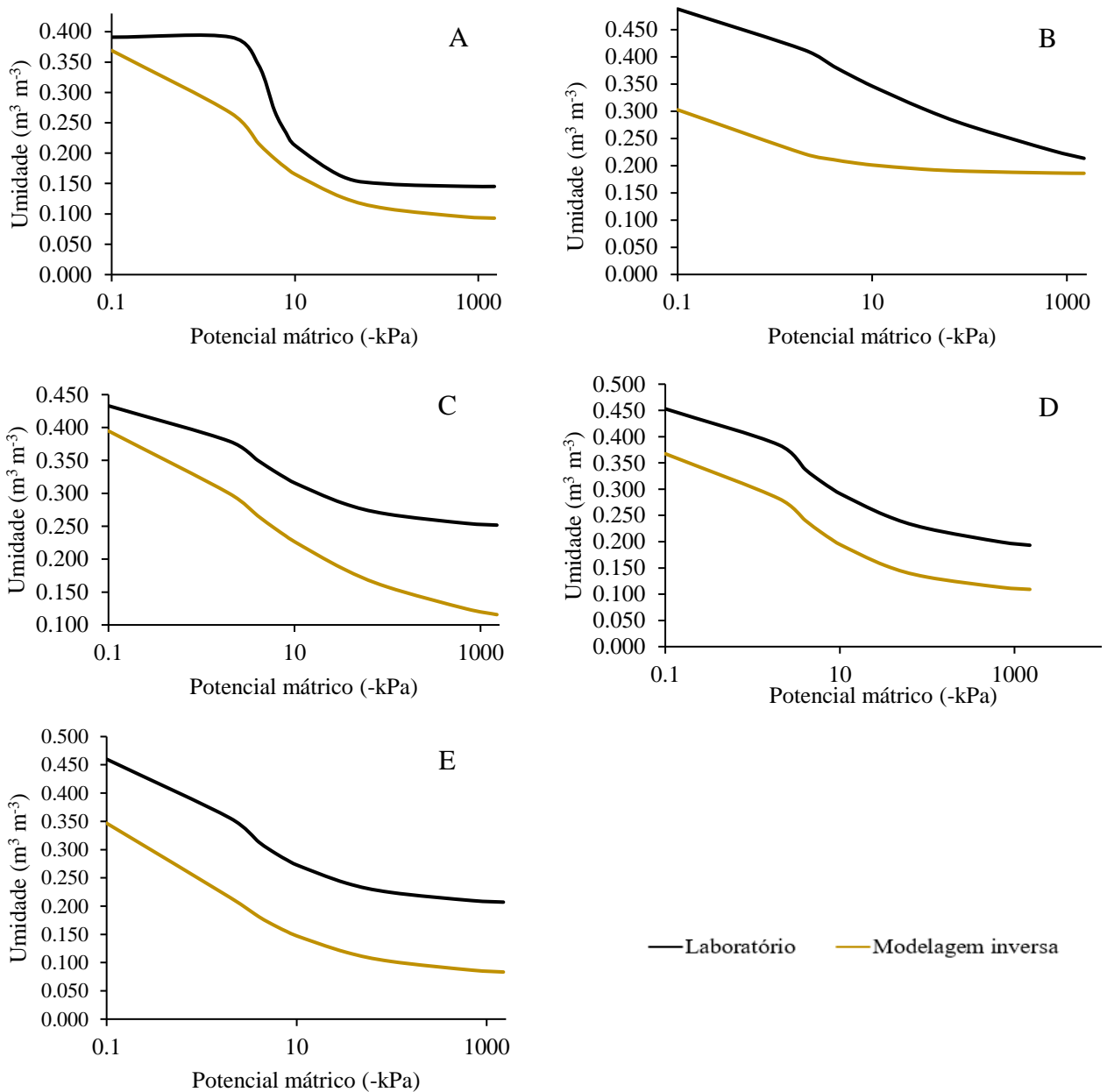
Gráfico 1 - Umidade média no tempo, medida in situ e ajustada pelo Hydrus-1D aplicando a modelagem inversa, para as classes texturais areia-franca (A), franco-argilo-arenosa (B), argilo-arenosa (C), franco-argilosa (D) e argila (E).



Fonte: Autor.

As curvas características de água no solo obtidas por modelagem inversa e em laboratório para a amplitude de classes texturais analisadas apresentam-se no Gráfico 2. Nota-se que, em todas as situações as curvas obtidas em condição de laboratório superestimam o conteúdo volumétrico de água no solo desde a saturação até o potencial de -1500 kPa quando comparadas às curvas por modelagem inversa.

Gráfico 2 - Curvas características de água do solo obtidas por modelagem inversa com o Hydrus – 1D e em laboratório para as classes texturais areia-franca (A), franco-argilo-arenosa (B), argilo-arenosa (C), franco-argilosa (D) e argila (E).



Fonte: Autor

Em estudo comparativo entre a curva característica de água no solo obtida em laboratório e a obtida pelo método inverso com Hydrus-1D, Nascimento *et al.* (2018) observaram que a curva de laboratório superestimou o conteúdo volumétrico de água, sendo os valores de retenção de água sempre maiores para o intervalo entre $\phi_m = 0$ e $\phi_m = 1$ m.

É importante destacar ainda que, de modo geral, o Hydrus-1D foi mais eficiente na estimativa da umidade do solo com reprodução mais fiel da realidade obtida em campo se comparado aos dados de laboratório, reforçando a importância e possibilidade de utilização rotineira do software na obtenção da umidade do solo em estudos que envolvam os atributos hidráulicos em qualquer classe textural, reduzindo os erros constatados em laboratório, o tempo e os custos para tais procedimentos. Esse pensamento é reforçado por Silva Júnior (2015) bem como por Feltrin, Paiva e Paiva (2013), tendo em vista a afirmação de que a determinação de propriedades hidráulicas do solo é onerosa e requer muito tempo, o que pode ser melhorado por meio da modelagem inversa que se vale de propriedades mais facilmente mensuráveis.

Ao se observar a umidade volumétrica na saturação (θ_s), que para o caso de laboratório correspondeu à porosidade total do solo, constatam-se os maiores valores para as curvas obtidas em condição de laboratório (Gráfico 2). Esse comportamento decorre do fato de que sob condições de campo o solo dificilmente é posto na saturação, sendo, de modo geral, a umidade considerada de saturação inferior à porosidade total. No campo, o processo de umedecimento do solo ocorre na maioria das situações no sentido da superfície até a profundidade considerada, o que causa mais facilmente o aprisionamento do ar em seus espaços porosos. Tal afirmação é corroborada por Šimůnek *et al.* (1999) ao relatarem que em condições de campo a umidade na saturação não representa a situação real da porosidade total do solo devido ao ar que fica aprisionado no solo e/ou dissolvido na água.

Com relação às umidades na saturação obtidas em laboratório, estas são menos influenciadas pela possibilidade de ar aprisionado nos espaços vazios do solo, devido a saturação ocorrer lentamente e de baixo para cima por capilaridade (MESQUITA; MORAES, 2004) em cilindros volumétricos, facilitando a saturação das amostras de solo. Isso é reforçado por Basile, Ciollaro e Coppola (2003), ao relatarem que as maiores umidades na saturação de amostras de solos em cilindros volumétricos em laboratório devem-se à facilidade de deslocamento do ar pela amostra, condição diferente das observadas em campo. Assim, a saturação de amostras em condições de laboratório não representa a condição real encontrada em campo (MOTA, 2010b).

Ghiberto (1999), estudando procedimento para obtenção de parâmetros utilizados em modelos de infiltração de água no solo, encontrou valores de 70-90% para a razão entre a umidade na saturação em condição de campo e a porosidade total calculada ($porosidade\ total = 1 - (densidade\ do\ solo / densidade\ de\ partículas)$). Por outro lado, Souza Neto (2004) ressalta que em ensaios de laboratório a saturação de amostras pode alcançar valores próximos a 100%, reforçando os resultados obtidos nesta pesquisa.

Ainda a respeito das curvas de água do solo (Gráfico 2), observa-se que a classe de textura mais arenosa apresentou um decréscimo mais expressivo do conteúdo de água com o aumento do ϕ_m , representando maior $\partial\theta/\partial t$ se comparada às classes texturais com maior conteúdo de argila. Tal condição se justifica por solos de textura arenosa apresentarem maior quantidade de partículas grandes e poros com maior diâmetro, favorecendo rápida resposta à variação de umidade no tempo em relação a solos de textura mais fina. Com isso, por conterem, proporcionalmente, elevada quantidade de macroporos, os solos arenosos apresentam excelente permeabilidade interna e pequena capacidade de retenção de água (ALMEIDA, 2009).

Por outro lado, os solos com maior incremento de argila apresentaram resposta mais lenta à variação de umidade no tempo, conseqüentemente, com maior retenção de água. Isso decorre da grande quantidade de microporos presentes nos solos de textura fina e da maior área superficial específica da fração de argila, capaz de manter maior afinidade entre a matriz do solo e as moléculas de água, favorecendo a retenção de água. Quanto a isso, Bortolini (2016) afirma que a área superficial específica apresenta o papel de extrema importância na retenção de água e demais elementos no solo, por representar a área de contato que as partículas do solo possuem para reter água, tanto em superfície externa quanto internamente à sua estrutura. Nota-se, então, que o aumento do conteúdo de argila proporciona maior energia de retenção de água no solo devido ao aumento das cargas que podem interagir com as moléculas de água (CARDUCCI *et al.*, 2011).

Considerando as curvas características de água no solo, é válido frisar que as condições de contorno para obtenção da mesma são muito divergentes entre amostras utilizadas em laboratório e as condições de campo, em que sob condições de laboratório as curvas são obtidas a determinados pontos podendo não representar dinamicamente o movimento de água ao longo de todo o perfil do solo. Assim, do ponto de vista prático torna-se evidente que as curvas simuladas pela modelagem inversa, considerando desde a umidade na saturação à capacidade de campo, reproduz mais fielmente a dinâmica de água no solo em campo do que aquelas obtidas em condição de laboratório.

Na Tabela 4 está presente a análise estatística das médias dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) considerando a obtenção das curvas características de água no solo em laboratório e por modelagem inversa no campo com Hydrus-1D. De forma geral, os quatro parâmetros do modelo que definem a curva característica de água no solo diferiram estatisticamente pelos dois métodos de obtenção. Para Carducci *et al.* (2011) as curvas de água no solo só podem ser consideradas iguais quando seus parâmetros forem estatisticamente iguais. Isso realça a evidência, que conforme o formato das curvas presentes Gráfico 2 e os parâmetros que modelam este formato, as curvas obtidas pelo método inverso são diferentes das obtidas em laboratório para todas as classes texturais.

Em relação ao θ_s , conforme relatado anteriormente, em condição de laboratório os valores de umidade volumétrica foram superiores aos obtidos pela modelagem inversa, visto que em laboratório a umidade na saturação é mais facilmente alcançada do que em campo (Tabela 4). O mesmo comportamento foi observado para o θ_r , sendo superestimado em condição de laboratório quando observados os resultados obtidos pela modelagem inversa.

Tabela 4 - Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten para a curva característica de água no solo média obtida com base em dados de campo por modelagem inversa com Hydrus-1D e em laboratório para as classes texturais analisadas.

| Parâmetro | Classe Textural | Métodos | |
|------------|-----------------------|----------------|----------------|
| | | Campo | Laboratório |
| θ_s | Areia-franca | 0,409 ± 0,08 a | 0,404 ± 0,01 a |
| | Franco-argilo-arenosa | 0,363 ± 0,04 b | 0,488 ± 0,01 a |
| | Argilo-arenosa | 0,390 ± 0,01 b | 0,460 ± 0,02 a |
| | Franco-argilosa | 0,333 ± 0,02 b | 0,453 ± 0,02 a |
| | Argila | 0,377 ± 0,01 b | 0,433 ± 0,01 a |
| θ_r | Areia-franca | 0,074 ± 0,08 b | 0,143 ± 0,06 a |
| | Franco-argilo-arenosa | 0,139 ± 0,03 a | 0,088 ± 0,02 a |
| | Argilo-arenosa | 0,153 ± 0,01 b | 0,200 ± 0,01 a |
| | Franco-argilosa | 0,100 ± 0,01 b | 0,172 ± 0,01 a |
| | Argila | 0,166 ± 0,01 b | 0,248 ± 0,01 a |
| α | Areia-franca | 0,288 ± 1,02 b | 5,397 ± 0,03 a |
| | Franco-argilo-arenosa | 1,838 ± 0,71 b | 18,88 ± 5,03 a |
| | Argilo-arenosa | 1,194 ± 0,25 b | 2,061 ± 0,58 a |
| | Franco-argilosa | 1,546 ± 0,50 a | 1,112 ± 0,16 a |
| | Argila | 5,090 ± 0,77 a | 0,740 ± 0,20 b |
| n | Areia-franca | 1,772 ± 0,09 b | 8,794 ± 3,85 a |
| | Franco-argilo-arenosa | 2,228 ± 0,34 a | 2,043 ± 0,50 a |
| | Argilo-arenosa | 1,360 ± 0,03 b | 2,616 ± 0,69 a |
| | Franco-argilosa | 1,367 ± 0,08 b | 5,129 ± 0,95 a |
| | Argila | 1,142 ± 0,04 a | 1,484 ± 0,20 a |

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem pelo teste *t* a 5% de significância.

Fonte: Autor.

Os maiores valores de θ_r observados em laboratório pode ter ocorrido devido ao fato de que sob condições laboratoriais, as propriedades hidráulicas do solo são obtidas em amostras de solo impondo um estado estacionário ou condições transitórias, diferentes das condições de contorno dos estudos obtidos em campo (BASILE *et al.*, 2003). Esses resultados vão em desacordo aos encontrados por Nascimento *et al.* (2018), visto que em seu estudo a umidade residual obtida por modelagem inversa pelo uso do Hydrus-1D superestimou os resultados obtidos em laboratório.

Do mesmo modo, os parâmetros α e n também apresentaram valores superiores em condições de laboratório. Conforme Jirků *et al.* (2013), o parâmetro ' n ' está diretamente relacionado com a declividade da curva característica de água no solo a uma dada tensão. Já α está associado ao inverso do valor de potencial mátrico em que ocorre a entrada de ar no maior poro do solo (MOTA *et al.*, 2017). Neste caso, subentende-se que em condições de campo o fenômeno de drenagem passa a ocorrer em potencial mátrico menor do que quando submetidos a ensaios de laboratório. Além disso, associado a n que está relacionado à distribuição de poros por tamanho e ao ponto de inflexão da curva, o alfa exerce influência na inclinação da reta que se tangencia o ponto de inflexão da curva, ambos apresentando relação com a umidade na capacidade de campo (ASSOULINE; OR, 2014). Assim, a variação estatística dos parâmetros empíricos da equação de van Genuchten (1980) listados na Tabela 4, demonstram a divergência entre as curvas obtidas nesse estudo.

É válido destacar que a diferença verificada entre as curvas pode ter implicações práticas distintas ao se avaliar as curvas para fins de irrigação, principalmente quanto ao tempo e quantidade de água a ser aplicada. A afirmação é corroborada por Barreto *et al.* (2011) ao relatarem que por meio da curva característica de água no solo é possível obter o momento certo e a quantidade de água a ser aplicada em cada irrigação, além, dos valores de umidade correspondentes à capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP), importantes para muitas aplicações agrícolas.

Com base na assertiva acima, as diferenças entre as curvas obtidas pelos métodos adotados nesse estudo, podem ainda ser verificada pelos valores das umidades na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível presentes na Tabela 5, os quais, em geral, diferem estatisticamente para os métodos de determinação adotados.

Tabela 5 - Umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e capacidade de água disponível (CAD) obtida com base em dados de campo por modelagem inversa com Hydrus-1D e em laboratório para as classes texturais analisadas.

| Parâmetro | Classe Textural | Métodos | |
|--------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|
| | | Campo | Laboratório |
| θ_{cc} $m^3 m^{-3}$ | Areia-franca | 0,099 ± 0,01 b | 0,206 ± 0,01 a |
| | Franco-argilo-arenosa | 0,189 ± 0,03 b | 0,239 ± 0,01 a |
| | Argilo-arenosa | 0,244 ± 0,01 b | 0,298 ± 0,03 a |
| | Franco-argilosa | 0,198 ± 0,01 b | 0,292 ± 0,04 a |
| | Argila | 0,248 ± 0,03 b | 0,323 ± 0,01 a |
| θ_{pmp} $m^3 m^{-3}$ | Areia-franca | 0,076 ± 0,01 b | 0,144 ± 0,01 a |
| | Franco-argilo-arenosa | 0,150 ± 0,02 a | 0,149 ± 0,01 a |
| | Argilo-arenosa | 0,170 ± 0,02 b | 0,243 ± 0,04 a |
| | Franco-argilosa | 0,125 ± 0,01 b | 0,193 ± 0,01 a |
| | Argila | 0,166 ± 0,03 b | 0,254 ± 0,01 a |
| CAD $m^3 m^{-3}$ | Areia-franca | 0,023 ± 0,01 b | 0,062 ± 0,01 a |
| | Franco-argilo-arenosa | 0,039 ± 0,02 b | 0,089 ± 0,03 a |
| | Argilo-arenosa | 0,066 ± 0,01 a | 0,055 ± 0,01 a |
| | Franco-argilosa | 0,072 ± 0,01 b | 0,098 ± 0,01 a |
| | Argila | 0,063 ± 0,01 b | 0,081 ± 0,01 a |

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem pelo teste *t* a 5% de significância.

Fonte: Autor.

Conforme a Tabela 5, os conteúdos de água medidos na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de água disponível (CAD) foram superestimados pelo método do laboratório se comparado aos obtidos com base em dados de campo. Tal fato traz evidências de que a modelagem inversa, desde que abastecida com dados de campo, torna possível um bom ajuste dos dados, permitindo estimar parâmetros hidráulicos de forma mais adequada, como é o caso dos três ora discutidos.

Ademais, os resultados reforçam a ideia de que as diferenças entre as curvas obtidas nesse estudo podem ter implicações práticas distintas, visto que nos cálculos para se determinar a lâmina de irrigação a ser aplicada, usam-se, em geral, as determinações de laboratório, o que, como observado, pode superestimar a capacidade de retenção de água pelo solo e, conseqüentemente, a quantidade de água a ser aplicada na irrigação. Com isso, fica subentendido que o método de determinação dos parâmetros hidráulicos do solo influencia diretamente nos cálculos das lâminas de irrigação (SOUZA *et al.*, 2000). Os resultados obtidos nesse estudo são ainda corroborados por Nascimento, Bassoi e Paz (2012) os quais encontraram diferenças entre as curvas de retenção de água no solo obtidas por tensiometria e determinações em laboratório comparadas as observações direta em campo, bem como a quantidade de água a ser aplicada na irrigação.

Ainda a respeito da Tabela 5, no tocante à capacidade de campo, diferenças têm sido observadas entre os métodos de laboratório quando comparados com o método direto no campo, considerado o mais exato e preciso (SOUZA *et al.*, 2000). Assim, comparativamente a este estudo, Alencar (2017) analisando diferentes métodos de determinação da capacidade de campo verificou que a θ_{cc} obtida diretamente em campo e estimada pela modelagem inversa não diferiram estatisticamente, indicando que a modelagem inversa estima os parâmetros hidráulicos do solo, especialmente θ_{cc} , de forma mais adequada às condições de campo.

Deste modo, por ser a determinação das propriedades hidráulicas do solo dispendiosa (SILVA JÚNIOR, 2015) a modelagem inversa torna possível reduzir os custos e o tempo de obtenção dessas propriedades e ainda obter uma representação mais real dessas variáveis. Além disso, apesar do modelo Hydrus-1D ainda precisar ser mais estudado sob condições *in situ* (KATO *et al.*, 2010), este estudo assume grande importância por demonstrar a capacidade e eficiência do modelo em estimar parâmetros hidráulicos do solo em uma ampla variação de classes texturais.

5 CONCLUSÃO

O Hydrus-1D, com a utilização da modelagem inversa, permite estimar os parâmetros da equação de van Genuchten de modo mais coerente com os dados obtidos *in situ* que aqueles obtidos em laboratório, independentemente da classe textural de solo.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P.E.P.; DURÃES, F.O.M. **Uso e Manejo de Irrigação**. Sete Lagoas: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2008, 528 p.

ALENCAR, T.L. **Uma abordagem teórico-metodológica da capacidade de campo**. 2017. 75 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2017.

ALMEIDA, A.B. **Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho manejado com material orgânico e submetido à compactação**. 2009. 111f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP, 2009.

ARRUDA, F.B.; ZULLO JR., J.; OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1987.

ASCE. Task Committee on definition of criteria for evaluation of watershed models of the watershed management. Committee Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n. 3, p. 429-442, 1993.

ASSOULINE, S.; OR, D. The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. **Water Resources Research**, v. 50, n. 6, p. 4787-4802, 2014.

BARRETO, H.B.F.; MAIA, P.M.E.; AMARAL JUNIOR, V.P.; SILVA NETO, S.J. Água disponível e parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten em cinco solos do Agropólo Assu-Mossoró. **Revista Verde**, v. 6, n. 5, p. 06-09, 2011.

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**, v. 39, n. 12, 1355. 2003.

BECK, J.V.; WOODBURY, K.A. Inverse problems and parameter estimation: integration of measurements and analysis. **Measurement Science and Technology**, v. 9, n. 6, p. 839-847, 1998.

BENEDÍ, J.A.; MUÑOZ-CARPENA, R. Soil-water-solute process characterization: an integrated approach. Florida: **CRC Press**, 2005. 787 p.

BERALDO, J.M.G. **Armazenamento de água no solo em sequencias de culturas de verão de inverno sob semeadura direta**. 2011. 128f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal – SP, 2011.

- BIASSUI, M. **Simulação da dinâmica de água no solo utilizando modelo numérico**. 2001. 97 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de agronomia, Porto Alegre – RS.
- BORTOLINI, D. **Estimativa da retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina**. 2016. 238f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages – SC, 2016.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 363-375, 1986a. (Agronomy Monography, 9).
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 377-382, 1986b. (Agronomy Monography, 9).
- BRAGA, M.B.; CALGARO, M. **Uso da tensiometria no manejo da irrigação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 8 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 235).
- BRASIL. Decreto Legislativo nº 9, de 7 de julho de 2017. Aprova o texto da Convenção de Minamata sobre Mercúrio, adotada em Kumamoto, Japão. Diário Oficial da União (Seção I), p. 2, 2017.
- CAMPOS VELHO, H.F. Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações. *In: Encontro de modelagem computacional, 4.*, 2001, Nova Friburgo. **Anais...Nova Friburgo: Anais São Carlos: SBMAC, 2001.**
- CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p.77-86, 2011.
- CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; SANTOS, R.A.; GIMÉNEZ, D.; REICHARDT, K. Funil de Haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**[online]. 2008, vol. 32, n. 6, p. 2555-2562. ISSN 1806-9657.
- CHAVES, H.M.L. Sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidráulicos do Solo em diferentes texturas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 33-37, 2009.
- CICHOTA, R.; VAN LIER, Q.J. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 585-596, 2004.
- DANE, J.H.; HRUSKA, S. In-situ determination of soil hydraulic properties during drainage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, n. 4, p. 619-624, 1983.
- DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 443-461, 1986. (Agronomy Monography, 9).

DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I. theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; RICHARD, G.; RESZKOWSKA, A. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, v. 143, n. 3, p. 243-253, 2008.

DIKINYA, O. Comparison of the instantaneous profile method and inverse modelling for the prediction of effective soil hydraulic properties. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 5, p. 599-606, 2005.

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 (version3.0 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, Washington, v. 30, n. 1, p. 211-223, 1994.

ECHING, S.O.; HOPMANS, J.W. Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure DataSoil Science Society of America Journal. **Soil Science Society America**, Califórnia, v. 57, n. 5, p. 1167-1175, 1993.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353 p.

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**. Conference: 11.º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, At Maputo, Moçambique. p. 1-12, 2013.

FERREIRA, M.M.; MARCOS, Z.Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática**, v. 7, p. 96-101, 1983.

FONTES, R.L.P.; GOMES, G.R.; LEMES, W.M.; MERAT, G.S.; MARÇAL, R.S. Avaliação do potencial matricial através de sensores de umidade – GMS e Tensiômetro – em parcelas de erosão com usos diversos: Estação experimental do DGEO/ FFP/ UERJ. In: Encontro Nacional dos Geógrafos, 16., 2010. Porto Alegre – RS. **Anais...** Porto Alegre: UERJ, 2010.

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.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 383-411, 1986. (Agronomy Monography, 9).

GILBERTO JÚNIOR, O.J. **Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo**. 2003. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2003.

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

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

JAMISON, V.C.; KROTH, E.M. Available moisture storage capacity in relation to texture composition and organic matter content of several Missouri soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 22, p. 189-192, 1958.

JANKOSZ, A.V. **Calibração e validação do modelo matemático Hydrus 1-D através de colunas de solo em laboratório**. 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Departamento de Ciências Agrárias. Paraná – PR.

JIRKŮ, V.; KODEŠOVÁ, R.; NIKODEM, A.; MŮHLHANSELOVÁ, M.; ŽIGOVÁ, A. Temporal variability of structure and hydraulic properties of topsoil of three soil types. **Geoderma**, v. 204-205, p. 43-58, 2013.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 635-662. (Agronomy Monography, 9).

KANZARI, S.; HACHICHA, M.; BOUHLILA, R.; BATTLE-SALES, J. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunísia (BouHajla, Kairouan) - Salinization risk of soils and aquifers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.86, p.34-42, 2012.

KATO, C.; NISHIMURA, T.; IMOTO, I.; MIYAZAKI, T. Applicability of hydrus to Predict Soil Moisture and Temperature in Vadose Zone of Arable Land under Monsoonal Climate Region, Tokyo. 19th **World Congress of Soil Science**, Soil Solutions for a Changing World 1 – 6, Brisbane, Australia. 2010.

KOOL, J.B.; PARKER, J.C.; VAN GENUCHTEN, M.T. Determining soil hydraulic properties from one-step outflow experiments by parameter estimation: I. Theory and numerical studies1. **Soil Science Society of American Journal**, v. 49, n. 6, p. 1348-1354, 1985.

KOOL, J.B.; PARKER, J.C.; VAN GENUCHTEN, M.T. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models - A review. **Journal of Hydrology**, v. 91, n. 3-4, p. 255-293, 1987.

KOOL, J.B.; PARKER, J.C. Analysis of the inverse problem for transient unsaturated flow. **Water Resources Research**, v. 24, n. 6, p. 817-830, 1988.

KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research**, Washington, v. 32, n. 9, p. 2697-2703, 1996.

LANGNER, H.W.; WRAITH, J.M.; INSKEEP, W.P.; GABER, H.M.; HUWE, B. Apparatus for constant-head solute transport and soil water characteristic determination. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 110-113, 1998.

LEE, J. **Limits to continuity of unsaturated, compacted soils**. Colorado, USA: University of Colorado, 2011. 158 p.

LEIJ, F.J.; RUSSELL, W.B.; LESCH, S.M. Closed-form expression for water retention and conductivity data. **Ground Water**, v. 35, n. 5, p. 848-858, 1997.

LEWANDOWSKA, J.; NGOC, T.D.T.; VAUCLIN, M.; BERTIN, H. Water drainage in double-porosity soils: experiments and micro-macro modeling. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Reston, v. 134, n. 2. p. 231-243, 2008.

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**, v. 35, p. 1957-1973, 2011.

MACHADO, J.; TORMENA, C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 495-502, 2008.

MARQUARDT, D.W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. de hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MIRANDA, F.R. **A distributed control system for priority-based site-specific irrigation**. 2007. 150 f. Doctor of Philosophy Thesis (Biosystems Engineering) - University of Tennessee, Knoxville, 2007.

MONTEIRO, A.L.N.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SANTOS, F.X. Avaliação de lavagem parcial de sais em Neossolo Flúvico irrigado, utilizando modelagem computacional. **Revista de Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 2, p. 207-220, 2009.

MOTA, A.A. **Avaliação da dinâmica da água a zoa vadosa em solos de diferentes usos com o modelo Hydrus-1D**. 2010. 45f. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2010a.

MOTA, J.C.A. **Componentes do balanço de água em um Cambissolo cultivado com meloeiro irrigado por gotejamento, com e sem cobertura da superfície**. 2010. 123f. Doutorado (Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Piracicaba – SP, 2010b.

MOTA, J.C.A.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; MORAES, S.O.; NASCIMENTO, I.V.; ALENCAR, T.A. Variabilidade espacial dos parâmetros da equação de van Genuchten em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 11, n. 2, p. 92-100, 2017.

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

NASCIMENTO, I.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**, v. 10, p. 102-110, 2018.

NASCIMENTO, P.S.; BASSOI, L.H. ; PAZ, V.P.S. Planilha eletrônica para auxílio à tomada de decisão em manejo de irrigação. **Irriga** (UNESP. CD-ROM), v. 17, p. 1-15, 2012.

OLIVEIRA, G.C.; JUNIOR, M.S.D.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.

PERROUX, K.M.; RAATS, P.A.C.; SMILES, D.E. Wetting moisture characteristic curves derived from constant-rate infiltration into thin samples. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 231-234, 1982.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. 2. ed. Barueri: **Editora Manole**, 2012. 500 p.

RICHARDS, L. Capillary conduction of liquids through porous medium. **Physics**, New York, v. 1., p. 318-333, 1931.

RICHARDS, L.A. A Pressure-Membrane Extraction Apparatus for Soil Solution. **Soil Science**, v. 51, p. 377-386, 1941.

RICHARDS, L.A.; FIREMAN, M. Pressure Plate Apparatus for Measuring Moisture Sorption and Transmission by Soils. **Soil Science**, v. 56, p. 395-404, 1943.

ROMANO, N. Use of an inverse method and geostatistics to estimate soil hydraulic conductivity for spatial variability analysis. **Geoderma**, v. 60, n. 1-4, p. 169-186, 1993.

SCARPARE, F.V.; VAN LIER, Q.J.; VAN DAM, J.C.; BARROS, A.H.C. Otimização dos parâmetros hidráulicos do solo por meio de modelagem inversa utilizando o programa "PEST". In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 33, Uberlândia. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. Disponível em: < <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/39764/1/1613-1-1.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, D. V. F. M. R. **Implantação de Técnica para Determinação de Parâmetros Hidráulicos e de Transporte de Solutos em Solos Visando a Aplicação em Simulação Computacional de Migração de Contaminantes**. 2010. 120f. Tese (Doutorado em

Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

SILVA, D.O.M. **Validação de um sensor de determinação da umidade do solo para o manejo da irrigação**. 2013. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Vale do São Francisco, Departamento de Engenharia Agrícola, UNIVASF, Juazeiro–BA.

SILVA, J.R.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; MONTEIRO, A.L.N.; SILVA JUNIOR, V.P. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 2, p. 293-303, 2015.

SILVA JUNIOR, J.J. **Aplicação do método inverso pelo modelo HYDRUS-2D para obtenção de propriedades hídricas de solos tropicais**. 2015. 110f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2015.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometer data by numerical inversion. **Water Resources Research**, v. 32, n. 9, p. 2683-2696, 1996.

ŠIMŮNEK, J.; WENDROTH, O.; VAN GENUCHTEN, M.T. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments. **Water Resources Research**, v. 35, n. 10, p. 2965-2979, 1999.

ŠIMŮNEK, J.; JACQUES, D.; LANGERGRABER, G.; BRADFORD, S.A.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M.T. Numerical modeling of contaminant transport using HYDRUS and its specialized modules. **Journal of the Indian Institute of Science**, v. 93, n. 2, p. 265–284, 2013.

ŠIMŮNEK, J. SEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN, M.T. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, **HYDRUS Software Series 3**, p. 343, 2013.

SOUZA, P.G.C. **Obtenção da curva de retenção de água em Latossolo empregando dados de mini-infiltrômetro e técnicas de modelagem**. 2015. 104f. Dissertação (Mestrado em Produção vegetal) – Universidade Federal de São José Del Rei, Sete Lagoas – MG, 2015.

SOUZA, C. C.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, I. F.; AMORIM NETO, M. S. Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p. 338-342, 2000.

SOUZA NETO, J. B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso)**. 2004. 468f. Tese – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.D.C.; DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 1, p. 56-60, 2008.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre, Editora da Universidade: UFRGS, Porto Alegre, 1998, 669p.

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**, 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**, v. 44, p. 892-897, 1980.

VIEIRA, M.L. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo**. 2006.115f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

VIEIRA, S.R.; CASTRO, O.M. Determinação em laboratório de curvas de retenção de água com tensiômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, n. 2, p. 87-90, 1987.

VOGEL, T.; CÍSLEROVÁ, M. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. **Transport in Porous Media, Phoenix**: v. 3, n. 1, p. 1-15, 1988.

ZENG, W.; XU, C.; WU, J.; HUANG, J. Soil salt leaching under different irrigation regimes: HYDRUS-1D modelling and analysis. **Journal of Arid Land**, v. 6, n. 1, p. 44-58, 2014.

ZHONG, X.; DUTTA, U. Engaging Nash-Sutcliffe efficiency and model efficiency factor indicators in selecting and validating effective light rail system operation and maintenance cost models. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 3, p. 255-265, 2015.

ZURMÜHL, T.; DURNER, W. Determination of parameters for bimodal hydraulic functions by inverse modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 4, p. 874, 1998.

APÊNDICE A – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE NA SATURAÇÃO EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARA TODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS

Areia franca

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------|---------------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,000068 | 0,000068 | 0.188 | 0.6758 |
| Erro | 8 | 0,002873 | 0,000359 | | |
| Total | 9 | 0,002940 | | | |
| MG = 0,4066000 | | | | CV (%) = 4,66 | |

Franco-argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------|----------------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,039063 | 0,039063 | 9,063 | 0,0168 |
| Erro | 8 | 0,034482 | 0,004310 | | |
| Total | 9 | 0,073544 | | | |
| MG = 0,4257000 | | | | CV (%) = 15,42 | |

Argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------|---------------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,012250 | 0,012250 | 8,606 | 0,0189 |
| Erro | 8 | 0,011388 | 0,001424 | | |
| Total | 9 | 0,023638 | | | |
| MG = 0,4250000 | | | | CV (%) = 8,88 | |

Franco-argilosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|---------------|----|----------|----------|----------------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,035880 | 0,035880 | 19,205 | 0,0023 |
| Erro | 8 | 0,014946 | 0,001868 | | |
| Total | 9 | 0,050826 | | | |
| MG = 0,050826 | | | | CV (%) = 10,98 | |

Argila

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------|---------------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,007840 | 0,007840 | 22,144 | 0,0015 |
| Erro | 8 | 0,002832 | 0,000354 | | |
| Total | 9 | 0,010672 | | | |
| MG = 0,4054000 | | | | CV (%) = 9,64 | |

**APÊNDICE B – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE
RESIDUAL EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARA TODAS AS
CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS**

Areia franca

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,011972 | 0,011972 | 56,872 | 0,0001 |
| Erro | 8 | 0,001684 | 0,000211 | | |
| Total | 9 | 0,013656 | | | |
| MG = 0,1092000 | | | CV (%) = 13,29 | | |

Franco-argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,006554 | 0,006554 | 2,894 | 0,1273 |
| Erro | 8 | 0,018114 | 0,002264 | | |
| Total | 9 | 0,024668 | | | |
| MG = 0,1142000 | | | CV (%) = 41,67 | | |

Argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,005523 | 0,005523 | 5,524 | 0,0467 |
| Erro | 8 | 0,007998 | 0,001000 | | |
| Total | 9 | 0,013520 | | | |
| MG = 0,1767000 | | | CV (%) = 17,89 | | |

Franco-argilosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|---------------|---------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,013250 | 0,013250 | 300,444 | 0,0014 |
| Erro | 8 | 0,000353 | 0,000044 | | |
| Total | 9 | 0,013602 | | | |
| MG = 0,1364000 | | | CV (%) = 4,87 | | |

Argila

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|---------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,082810 | 0,082810 | 194,847 | 0,0011 |
| Erro | 8 | 0,003400 | 0,000425 | | |
| Total | 9 | 0,086210 | | | |
| MG = 0,1570000 | | | CV (%) = 13,13 | | |

**APÊNDICE C – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA ALFA EM
CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES
TEXTURAIIS ANALISADAS**

Areia franca

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|-----------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 65,254703 | 65,254703 | 24,789 | 0,0011 |
| Erro | 8 | 21,059560 | 2,632445 | | |
| Total | 9 | 86,314262 | | | |
| MG = 2,8427000 | | | CV (%) = 57,08 | | |

Franco-argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|-----------------|----|-------------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 726,841502 | 726,841502 | 11,258 | 0,0100 |
| Erro | 8 | 516,517400 | 64,564675 | | |
| Total | 9 | 1243,358902 | | | |
| MG = 10,3635000 | | | CV (%) = 77,53 | | |

Argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 1,881824 | 1,881824 | 1,894 | 0,2061 |
| Erro | 8 | 7,950109 | 0,993764 | | |
| Total | 9 | 9,831934 | | | |
| MG = 1,6278000 | | | CV (%) = 61,24 | | |

Franco-argilosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,470022 | 0,470022 | 0,694 | 0,4290 |
| Erro | 8 | 5,419712 | 0,677464 | | |
| Total | 9 | 5,889734 | | | |
| MG = 1,3296000 | | | CV (%) = 61,90 | | |

Argila

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|-----------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 47,306250 | 47,306250 | 29,643 | 0,0006 |
| Erro | 8 | 12,766800 | 1,595850 | | |
| Total | 9 | 60,073050 | | | |
| MG = 2,9150000 | | | CV (%) = 43,34 | | |

**APÊNDICE D – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA n EM CONDIÇÃO
DE CAMPO E DE LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIIS
ANALISADAS**

Areia franca

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|------------|-----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 123,285254 | 123,285254 | 3,312 | 0,1062 |
| Erro | 8 | 297,749833 | 37,218729 | | |
| Total | 9 | 421,035088 | | | |
| MG = 5,2832000 | | | CV (%) = 115,47 | | |

Franco-argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,085008 | 0,085008 | 0,092 | 0,7695 |
| Erro | 8 | 7,401889 | 0,925236 | | |
| Total | 9 | 7,486898 | | | |
| MG = 2,1358000 | | | CV (%) = 45,04 | | |

Argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|-----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 3,940073 | 3,940073 | 3,216 | 0,1107 |
| Erro | 8 | 9,802097 | 1,225262 | | |
| Total | 9 | 13,742170 | | | |
| MG = 1,9883000 | | | CV (%) = 55,67 | | |

Franco-argilosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|-----------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 35,389134 | 35,389134 | 15,337 | 0,0044 |
| Erro | 8 | 18,459726 | 2,307466 | | |
| Total | 9 | 53,848860 | | | |
| MG = 3,2486000 | | | CV (%) = 46,76 | | |

Fonte: Autor.

Argila

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,292410 | 0,292410 | 2,627 | 0,1437 |
| Erro | 8 | 0,890600 | 0,111325 | | |
| Total | 9 | 1,183010 | | | |
| MG = 1,3130000 | | | CV (%) = 25,41 | | |

**APÊNDICE E – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE NA
CAPACIDADE DE CAMPO EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE LABORATÓRIO
PARA TODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS**

Areia franca

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,028815 | 0,028815 | 46,440 | 0,0001 |
| Erro | 8 | 0,004964 | 0,000620 | | |
| Total | 9 | 0,033779 | | | |
| MG = 0,1532800 | | | CV (%) = 16,25 | | |

Franco-argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,006121 | 0,006121 | 2,119 | 0,1835 |
| Erro | 8 | 0,023103 | 0,002888 | | |
| Total | 9 | 0,029224 | | | |
| MG = 0,2143200 | | | CV (%) = 25,07 | | |

Argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,007252 | 0,007252 | 3,256 | 0,1088 |
| Erro | 8 | 0,017816 | 0,002227 | | |
| Total | 9 | 0,025069 | | | |
| MG = 0,2715700 | | | CV (%) = 17,38 | | |

Franco-argilosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|---------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,022081 | 0,022081 | 0,188 | 0,6758 |
| Erro | 8 | 0,003401 | 0,000425 | | |
| Total | 9 | 0,025482 | | | |
| MG = 0,2450300 | | | CV (%) = 8,41 | | |

Argila

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,013995 | 0,013995 | 7,040 | 0,0291 |
| Erro | 8 | 0,015903 | 0,001988 | | |
| Total | 9 | 0,029898 | | | |
| MG = 0,2858300 | | | CV (%) = 15,60 | | |

**APÊNDICE F – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE NO
PONTO DE MURCHA PERMANENTE EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE
LABORATÓRIO PARATODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS**

Areia franca

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,011594 | 0,011594 | 63,688 | 0,0001 |
| Erro | 8 | 0,001456 | 0,000182 | | |
| Total | 9 | 0,013050 | | | |
| MG = 0,1101500 | | | CV (%) = 12,25 | | |

Franco-argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|-------------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 8,410000000 | 8,410000000 | 0,001 | 0,9793 |
| Erro | 8 | 0,009416 | 0,001177 | | |
| Total | 9 | 0,009417 | | | |
| MG = 0,1501900 | | | CV (%) = 22,84 | | |

Argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,013177 | 0,013177 | 3,380 | 0,1033 |
| Erro | 8 | 0,031190 | 0,003899 | | |
| Total | 9 | 0,044367 | | | |
| MG = 0,2068400 | | | CV (%) = 30,19 | | |

Franco-argilosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,011662 | 0,011662 | 20,985 | 0,0018 |
| Erro | 8 | 0,004446 | 0,000556 | | |
| Total | 9 | 0,016108 | | | |
| MG = 0,1596300 | | | CV (%) = 14,77 | | |

Argila

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,019044 | 0,019044 | 7,993 | 0,0222 |
| Erro | 8 | 0,019061 | 0,002383 | | |
| Total | 9 | 0,038105 | | | |
| MG = 0,2105000 | | | CV (%) = 23,19 | | |

**APÊNDICE G – TABELAS DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA UMIDADE NA
CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL EM CONDIÇÃO DE CAMPO E DE
LABORATÓRIO PARA TODAS AS CLASSES TEXTURAIS ANALISADAS**

Areia franca

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,003865 | 0,003865 | 7,119 | 0,0284 |
| Erro | 8 | 0,004343 | 0,000543 | | |
| Total | 9 | 0,008208 | | | |
| MG = 0,0430800 | | | CV (%) = 54,09 | | |

Franco-argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,006260 | 0,006260 | 6,284 | 0,0366 |
| Erro | 8 | 0,007969 | 0,000996 | | |
| Total | 9 | 0,014229 | | | |
| MG = 0,0640800 | | | CV (%) = 49,25 | | |

Argilo-arenosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|-------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,000282 | 0,000282 | 0,581 | 0,4677 |
| Erro | 8 | 0,003881 | 0,000485 | | |
| Total | 9 | 0,004163 | | | |
| MG = 0,0606900 | | | CV (%) = 36,29 | | |

Franco-argilosa

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|----------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,001654 | 0,001654 | 12,045 | 0,0084 |
| Erro | 8 | 0,001098 | 0,000137 | | |
| Total | 9 | 0,002752 | | | |
| MG = 0,0853600 | | | CV (%) = 13,73 | | |

Argila

| FV | GL | SQ | QM | Fc | Pr>Fc |
|----------------|----|----------|---------------|--------|--------|
| Tratamento | 1 | 0,000854 | 0,000854 | 22,144 | 0,0015 |
| Erro | 8 | 0,000308 | 0,000039 | | |
| Total | 9 | 0,001162 | | | |
| MG = 0,0722600 | | | CV (%) = 8,59 | | |

APÊNDICE H - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO NO HYDRUS 1D

| Classe Textural | Repetição | Material | θ_r | θ_s | α | n | K_s | l |
|-----------------------|-----------|----------|------------|------------|----------|------|--------|-----|
| Areia Franca | 1 | 1 | 0,045 | 0,43 | 1 | 2,68 | 0,1 | 0,5 |
| | | 2 | 0,065 | 0,41 | 7,5 | 1,89 | 0,044 | 0,5 |
| Areia Franca | 2 | 1 | 0,045 | 0,43 | 7 | 2,68 | 0,1 | 0,5 |
| | | 2 | 0,065 | 0,41 | 7,5 | 1,89 | 0,044 | 0,5 |
| Areia Franca | 3 | 1 | 0,045 | 0,43 | 5,3 | 1,8 | 0,1 | 0,5 |
| | | 2 | 0,065 | 0,41 | 6 | 2 | 0,044 | 0,5 |
| Areia Franca | 4 | 1 | 0,045 | 0,43 | 7,5 | 2,68 | 0,1 | 0,5 |
| | | 2 | 0,065 | 0,41 | 7,5 | 1,89 | 0,044 | 0,5 |
| Areia Franca | 5 | 1 | 0,045 | 0,43 | 2 | 3,68 | 0,1 | 0,5 |
| | | 2 | 0,065 | 0,41 | 7,5 | 1,89 | 0,044 | 0,5 |
| Areia Franca | Média | 1 | 0,045 | 0,430 | 1 | 2,68 | 0,1 | 0,5 |
| | | 2 | 0,065 | 0,410 | 7,5 | 1,89 | 0,044 | 0,5 |
| Argila | 1 | 1 | 0,093 | 0,41 | 1,90 | 1,31 | 0,0026 | 0,5 |
| | | 2 | 0,085 | 0,380 | 3,52 | 1,09 | 1,04 | 0,5 |
| Argila | 2 | 1 | 0,093 | 0,41 | 1,90 | 1,31 | 0,03 | 0,5 |
| | | 2 | 0,068 | 0,38 | 0,89 | 1,09 | 0,02 | 0,5 |
| Argila | 3 | 1 | 0,075 | 0,38 | 2,89 | 2,48 | 0,003 | 0,5 |
| | | 2 | 0,068 | 0,38 | 6,8 | 1,09 | 1,35 | 0,5 |
| Argila | 4 | 1 | 0,095 | 0,41 | 1,9 | 1,31 | 0,0026 | 0,5 |
| | | 2 | 0,068 | 0,38 | 6,8 | 1,09 | 2,88 | 0,5 |
| Argila | 5 | 1 | 0,095 | 0,389 | 2,84 | 1,31 | 0,0026 | 0,5 |
| | | 2 | 0,068 | 0,380 | 2,39 | 1,09 | 1,8 | 0,5 |
| Argila | Média | 1 | 0,095 | 0,380 | 2,89 | 1,09 | 0,700 | 0,5 |
| | | 2 | 0,068 | 0,380 | 0,80 | 1,09 | 0,004 | 0,5 |
| Argilo-arenosa | 1 | 1 | 0,100 | 0,380 | 4 | 1,23 | 0,0012 | 0,5 |
| | | 2 | 0,068 | 0,390 | 2,48 | 1,56 | 1,04 | 0,5 |
| Argilo-arenosa | 2 | 1 | 0,100 | 0,39 | 2,7 | 1,23 | 0,0012 | 0,5 |
| | | 2 | 0,078 | 0,38 | 2,47 | 1,56 | 1,04 | 0,5 |
| Argilo-arenosa | 3 | 1 | 0,100 | 0,36 | 2,7 | 1,20 | 0,0012 | 0,5 |
| | | 2 | 0,078 | 0,38 | 2,47 | 1,56 | 1,04 | 0,5 |
| Argilo-arenosa | 4 | 1 | 0,089 | 0,38 | 2,7 | 1,23 | 0,0012 | 0,5 |
| | | 2 | 0,100 | 0,38 | 2,47 | 1,56 | 1,04 | 0,5 |
| Argilo-arenosa | 5 | 1 | 0,165 | 0,395 | 3,8 | 1,89 | 0,0012 | 0,5 |
| | | 2 | 0,068 | 0,398 | 1,62 | 1,56 | 0,004 | 0,5 |
| Argilo-arenosa | Média | 1 | 0,100 | 0,374 | 2,87 | 1,4 | 0,09 | 0,5 |
| | | 2 | 0,068 | 0,380 | 3 | 1,09 | 0,02 | 0,5 |
| Franco-argilosa | 1 | 1 | 0,078 | 0,38 | 5,9 | 1,48 | 0,009 | 0,5 |
| Franco-argilosa | 2 | 1 | 0,068 | 0,35 | 2,89 | 1,48 | 0,008 | 0,5 |
| Franco-argilosa | 3 | 1 | 0,078 | 0,380 | 2,89 | 1,48 | 0,008 | 0,5 |
| Franco-argilosa | 4 | 1 | 0,068 | 0,35 | 2,89 | 1,58 | 0,008 | 0,5 |
| Franco-argilosa | 5 | 1 | 0,068 | 0,350 | 2,89 | 1,58 | 0,008 | 0,5 |
| Franco-argilosa | Média | 1 | 0,100 | 0,390 | 0,98 | 3,55 | 0,10 | 0,5 |
| Franco-argilo-arenosa | 1 | 1 | 0,036 | 0,421 | 3 | 2,48 | 0,08 | 0,5 |
| Franco-argilo-arenosa | 2 | 1 | 0,036 | 0,421 | 3 | 2,48 | 0,08 | 0,5 |
| Franco-argilo-arenosa | 3 | 1 | 0,100 | 0,43 | 1,2 | 2,48 | 0,06 | 0,5 |
| Franco-argilo-arenosa | 4 | 1 | 0,100 | 0,38 | 0,89 | 2,23 | 0,031 | 0,5 |
| Franco-argilo-arenosa | 5 | 1 | 0,100 | 0,39 | 5,9 | 1,48 | 0,031 | 0,5 |