



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



JONATHAN TENÓRIO SANTOS

**PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE UM LATOSSOLO AMARELO EM
DIFERENTES PROFUNDIDADES**

Rio Largo - AL

2023

JONATHAN TENÓRIO SANTOS

**PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DE UM LATOSSOLO AMARELO EM
DIFERENTES PROFUNDIDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo, pelo Campus de
Engenharias e Ciências Agrárias da
Universidade Federal de Alagoas.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alex dos Santos

Rio Largo - AL

2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

S237p Santos, Jonathan Tenório

Propriedades hidráulicas de um lotossolo amarelo em diferentes profundidades. / Jonathan Tenório Santos - 2023.
28 f.; il.

Monografia de Graduação em Agronomia (Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias. Rio Largo, 2024.

Orientação: Dr. Marcos Alex dos Santos

Inclui bibliografia

1. Hidráulica de solo. 2. Curva de retenção. 3. Funil de Haines.
I. Título

CDU: 626.8

RESUMO

A região alagoana conta com informações escassas sobre propriedades hidráulicas como curva de retenção da água no solo CR e condutividade hidráulica de solo saturado (K_{sat}). Portanto este trabalho objetivou determinar a curva de retenção da água no solo, e a condutividade hidráulica saturada do solo K_{sat} , visto a escassez desses dados na região alagoana. As amostras de solo indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos com 5 cm de diâmetro e altura de 2,65 cm (volume de 52,03 cm³), com utilização de um trado para amostrada indeformada (SONDATERRA^R). As amostras foram retiradas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm com 4 repetições para cada profundidade para determinação de K_{sat} e 2 repetições para curva de retenção. O programa computacional RETC é capaz de gerar parâmetros da equação de Van Genuchten que se ajustaram aos dados obtidos pelo funil de Haines e câmara de Richards de maneira satisfatória. O programa Rosetta utilizando, para a camada de 0-10 cm, do solo estudo utilizando-se dados de granulometria e densidade pode apresentar uma estimativa da condutividade hidráulica saturada do solo. Porém não é recomendado para as demais profundidades. Desta forma, de modo geral, uma análise com funções de pedotransferências provenientes de ajustes de solos locais é essencial.

Palavras-chave: Condutividade Hidráulica de solo saturado; Curva de retenção, Permeâmetros; Funil de Haines.

ABSTRACT

The Alagoas region has scarce information on hydraulic properties such as soil water retention curve CR and hydraulic conductivity of saturated soil Ksat. Therefore, this work aimed to determine the water retention curve in the soil, and the saturated hydraulic conductivity of the soil Ksat, given the scarcity of these data in the Alagoas region. The undisturbed soil samples were collected in volumetric rings with a diameter of 5 cm and a height of 2.65 cm (volume of 52.03 cm³), using an auger for undisturbed samples (SONDATERRA^R). The samples were taken at depths of 0-10 and 10-20 cm with 4 repetitions for each depth to determine Ksat and 2 repetitions for the retention curve. The computer program RETC is capable of generating Van Genuchten equation parameters that satisfactorily fit the data obtained by the Haines funnel and Richards chamber. The Rosetta program using, for the 0-10 cm layer, of the study soil using granulometry and density data can present an estimate of the saturated hydraulic conductivity of the soil. However, it is not recommended for other depths. Therefore, in general, an analysis with pedotransfer functions arising from local soil adjustments is essential.

Keywords: Hydraulic Conductivity of saturated soil, Retention curve, Permeameter, Haines Funnel

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Conteúdo de Água no Solo	10
2.2 Potenciais da Água no Solo	11
2.2.1 Potencial Matricial	11
2.2.2 Potencial Osmótico.....	12
2.2.3 Potencial de Pressão	12
2.2.3 Potencial de Gravitacional	12
2.3 Propriedades Hidráulicas	13
2.3.1 Curva de Retenção.....	14
2.3.2 Condutividade hidráulica de solo saturado	16
2.3.3 Funções de Pedotransferência	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Solo.....	18
3.2 Curva de Retenção – Funil de Haines	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 Curva de Retenção	21
4.2 Condutividade Hidráulica Saturada do Solo Ksat.....	23
5. CONCLUSÕES	25
6. REFERÊNCIAS	26

1. INTRODUÇÃO

A água no solo corresponde à quantidade de água que ocupa os espaços porosos nele presente, afetando diretamente nas propriedades físicas e hidráulicas do solo. Como estas propriedades afetam substancialmente o crescimento e desenvolvimento das plantas, atividades agrícolas tais como irrigação e drenagem dependem de informações sobre as propriedades hidráulicas do solo. No contexto de estudos relacionados à dinâmica da água solo, as propriedades hidráulicas de um solo são representadas pelas curvas de retenção CR e condutividade hidráulica no solo. Nesta última, um dos parâmetros mais requeridos é condutividade hidráulica de solo saturado K_{sat} .

A curva de retenção corresponde à relação entre potencial matricial de água h e o conteúdo de água no solo θ . A CR é comumente obtida em laboratório pelos métodos do funil de Haines e Câmara de Richards, no entanto, pode ser obtida diretamente *in situ* através de medições simultâneas de θ e h . No método de Funil de Haines, h é limitado a -13 kPa, o que torna necessária a utilização da câmara de Richards para medições de potencial matricial até -1500 kPa (Melo et al., 2015). O modelo mais utilizado para representação da CR é o modelo de Van Genuchten e Mualem (Van Genuchten 1980; Mualem, 1976). Diversas técnicas de otimização podem ser usadas para o ajuste da CR, no entanto, em muitas aplicações, é comum a utilização do software RETC *RETention Curve* (Van Genuchten et al., 1991).

A condutividade hidráulica saturada K_{sat} está relacionada com a velocidade com que a água se movimenta no solo em estado de saturação. O permeâmetro de carga constante é um dos métodos laboratoriais mais utilizados para obtenção de K_{sat} . Esse método exige cautela em sua execução para manter a integridade das amostras. Entretanto, existem modelos capazes de simular K_{sat} assim como os parâmetros da CR com dados mais facilmente obtidos, tais como textura do solo, densidade do solo e conteúdo de matéria orgânica. Esses modelos são denominados de funções de pedotransferência. O programa ROSETTA (Levien, 2012), por exemplo, utiliza funções de pedotransferências para estimar o K_{sat} .

Neste contexto e considerando que, as Informações sobre propriedades hidráulicas dos solos são escassas, especialmente nas regiões do nordeste do Brasil. Este trabalho teve como objetivo determinar a curva de retenção da água do solo, a

condutividade hidráulica de solo saturado e avaliar valores obtidos pelas funções de pedotransferência do ROSETTA incluídas no RETC.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conteúdo de Água no Solo

A determinação da quantidade de água presente no solo é aplicada em diversas práticas agronômicas, tais como para o dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação e drenagem e preparo do solo. Ao considerar aspectos de interferência direta sobre o conteúdo de água no solo, a porosidade, textura e densidade do solo são os mais relevantes. Ou seja, o conteúdo de água no solo é influenciado por um conjunto de propriedades físicas do solo.

Em solos com maior quantidade de macroporos, a infiltração da água no solo, ou seja, a entrada do fluido entre o meio poroso, ocorre de maneira rápida. No entanto, a capacidade de retenção de água (capacidade do solo de aderir a água à sua matriz) nesse tipo de solo é baixa, diminuindo a disponibilidade de água do solo às plantas. Todavia, em solos com maior quantidade de microporos, a infiltração ocorre de maneira mais lenta, e a capacidade de retenção de água aumenta.

A determinação da umidade do solo é feita, assim como outras grandezas em Hidrologia e Física dos Solos, por grandezas físicas intensivas. Considere uma certa amostra de solo de massa m e volume V , uma forma de expressar a umidade dessa amostra é através da razão entre a massa de água m_a da amostra e massa de sólidos m_s , ou seja:

$$U = \frac{m_a}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s}. \quad (1)$$

Note que $m_a = m - m_s$. Esta grandeza física U (kg kg^{-1}) é comumente chamada de umidade (ou conteúdo) de água do solo à base de massa. Para se obter U , obtém-se inicialmente a massa da amostra de solo no estado natural e massa de água por diferença entre a massa no seu estado inicial e a massa da amostra após sucessivas secagens (m_s). A secagem é geralmente feita em estufa a 105 °C durante 24 a 72 horas, até que a massa da amostra se torne constante. Este método é conhecido como método gravimétrico.

Outra forma de se determinar a umidade de água no solo à base volume θ ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) obtido pela razão entre o volume de água do solo V_a (m^3) e o volume de solo da amostra V :

$$\theta = \frac{V_a}{V} \quad 02$$

Note que V e V_a podem ser obtidos de maneira indireta, respectivamente, pela densidade do solo ρ (kg m^{-3}) e massa específica da água ρ_a (kg m^{-3}):

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad 03$$

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} \quad 04$$

Inserindo-se as eqs. (03) e (04) na eq. (02), obtém-se:

$$\theta = U \frac{\rho}{\rho_a} = \frac{m - m_s}{\rho_a V} \quad (05)$$

2.2 Potenciais da Água no Solo

O potencial da água no solo é uma grandeza física que expressa a energia potencial específica da água do solo em relação à energia específica da água em uma fase padrão (HILLEL, 2014), denominado água livre. Comparando-se com a água no estado livre, a água no solo está sujeita a diferentes potenciais, de modo que define-se o potencial total da água no solo H (m) por:

$$H = h + h_o + h_p + h_z \quad (06)$$

em que h (m) é o potencial matricial do solo; h_o (m), o potencial osmótico; h_p (m), o potencial de pressão; e h_z (m), o potencial gravitacional.

2.2.1 Potencial Matricial

O matricial (h) é o resultado da relação entre a água e a matriz do solo pela interação conjunta da capilaridade (força que atua na retenção da água nos microporos) e adsorção (força responsável pela retenção da água na superfície das partículas do solo). Ao considerar a diferença entre a energia potencial total da água livre (E_o) e a energia potencial da água no solo (E) como resultado somente da força matricial pelo volume de água (V_a), tem-se então:

$$h = \frac{E - E_o}{V_a} \quad (07)$$

Na situação de um solo não saturado a água atraída pela matriz do solo apresenta menor energia que a água livre ($E_o > E$). Portanto, o valor do potencial é sempre negativo.

2.2.2 Potencial Osmótico

O potencial osmótico da água no solo é outro componente importante do potencial total de água no solo. Este por sua vez está relacionado à concentração de solutos (sais, íons, entre outros) dissolvidos na água do solo. Em função do princípio da osmose, a água no solo tende a mover-se de locais com menos concentração de solutos em direção a regiões com maior concentração de solutos (DE JONG VAN LIER, 2020).

O potencial osmótico é negativo e pode ser obtido pela relação entre a constante universal dos gases (R), a temperatura (T) e a concentração molar dos solutos (C):

$$h_o = -RTC \quad (08)$$

Note que este potencial é diretamente proporcional à concentração de íons da solução do solo, quanto maior a concentração de solutos, maior o potencial osmótico. Portanto em solos com alta concentração de solutos, a água no solo terá um potencial osmótico mais negativo, o que pode dificultar a absorção de água pelas plantas.

2.2.3 Potencial de Pressão

O potencial de pressão (h_p) representa a energia da água em função da pressão hidrostática exercida sobre ela. Ao tomar a pressão atmosférica como referência, e se esta for igual ao potencial de pressão em determinado ponto, ambas se anulam e o potencial de pressão se iguala a zero. No entanto, este só é considerado para solos em estado de saturação.

2.2.3 Potencial de Gravitacional

A força gravitacional se refere à força de atração dos corpos da superfície ao centro da terra. É obtido pelo resultado entre a massa do corpo em questão e a aceleração gravitacional. O potencial gravitacional da água no solo é obtido através da elevação do ponto de medição em relação a algum nível de referência sem um padrão definido. Quando essa referência é adotada como abaixo do perfil do solo o potencial é considerado

zero ou positivo, no entanto, se a superfície do solo for escolhida como nível de referência, qualquer ponto abaixo do referencial em questão é considerado negativo (HILLEL, 2014). Portanto, acima do referencial (z) pela aceleração da gravidade (g), o potencial gravitacional é obtido por unidade de massa como:

$$h_z = g z \quad (09)$$

No entanto, a obtenção do potencial gravitacional pode ser por unidade de volume se multiplicada pela densidade da água (ρ_a):

$$h_z = \rho_a g z \quad (10)$$

O potencial gravitacional, então, não depende de fatores químicos ou de pressão. É somente dependente da elevação em relação ao referencial.

2.3 Propriedades Hidráulicas

As propriedades hidráulicas são responsáveis por determinar o movimento de água no solo, além de fornecer relações entre umidade e a matriz do solo. Essas propriedades são caracterizadas pela curva de retenção CR e condutividade hidráulica de solo saturado K_{sat} e apresentam em sua aferição alta variabilidade devido à heterogeneidade do solo.

As informações das propriedades hidráulicas do solo podem ser obtidas por métodos de campo e de laboratório. Cada método tem, em sua particularidade, vantagens e desvantagens a depender das condições escolhidas para condução dos trabalhos. Métodos de campo, no geral, são mais caros para se conduzir e mais trabalhosos por necessitar que as estruturas do solo não alterem de maneira significativa (LIBARD, 2005), além de serem menos flexíveis quanto à variabilidade espacial do solo. No entanto, apresentam condições mais próximas da realidade. Métodos de laboratório para casos de solo saturado (foco deste trabalho), embora mais flexíveis, precisam de muita cautela em sua execução para que as aferições estejam o mais próximo possível das condições reais.

O permeâmetro de carga constante e o permeâmetro de carga variável são os métodos de laboratório mais utilizados para obtenção da K_{sat} por fornecerem resultados mais condizentes com a realidade (LIBARDI et al., 1980). Para a obtenção da CR, a câmara de Richards e a mesa de tensão ou funil de Haines são os métodos de laboratório mais utilizados (LIBARDI, 2005; LUCAS et al, 2011).

No campo, o método do perfil instantâneo para situação de solo não saturado, tensiômetros e piezômetros são os métodos mais utilizados. Mais sobre esses métodos podem ser encontrados em Libardi (2005) e HILLEL (2014).

Outra forma de obter informações de propriedades hidráulicas do solo é por meio de funções de pedotransferência, que relacionam equações matemáticas com propriedades do solo mais facilmente mensuráveis, como porosidade, densidade, textura do solo

2.3.1 Curva de Retenção

A curva de retenção CR da água no solo é uma propriedade hidráulica que relaciona o potencial matricial e o conteúdo de água no solo. Ou seja, é uma propriedade que está diretamente relacionada com a disponibilidade da água para as plantas por descrever a tensão necessária para que haja extração da água de determinada amostra de solo através da relação da quantidade de água no solo em equilíbrio com a tensão aplicada (LIBARDI, 2005).

A maioria dos métodos de medida de CR segue um esquema semelhante quando uma amostra de solo saturada, sob pressão atmosférica, perde água após ser submetida à diferentes tensões. Para cada nível de tensão, mede-se o valor do conteúdo de água no solo à base de volume. A determinação de CR pode ser feita em laboratório pelo método do papel filtro, da câmara de Richards, funil de Haines, mesa de tensão, psicrômetro e centrífuga (COLLARES et al., 2002; LIBARDI, 2005; LUCAS et al., 2011; MELO FILHO et al., 2015). O mais utilizado é o método da câmara de Richards por ser capaz de trabalhar com tensões até -1500 kPa. Este consiste na utilização de uma câmara fechada em um sistema semelhante ao de uma panela de pressão, apropriada para resistir a pressões elevadas, em conjunto com uma placa porosa interna capaz de possibilitar

contato hidráulico para sucção da água do solo sem alterar a estrutura da amostra que pode ser deformada ou indeformada.

No método da câmara de Richards as amostras são colocadas na placa porosa e saturadas durante 24 horas para então serem submetidas à pressão. O ar é injetado para que haja aumento na pressão interna, o que ocasiona o movimento da água das amostras de solo para um recipiente abaixo da placa. Este, por sua vez, é conectado a um sistema que possibilita manter uma coluna de água ligado às amostras para manter o contato hidráulico. A água excedente nesse sistema, pinga até atingir o equilíbrio (quando o potencial matricial compensa o valor da pressão interna). As amostras em seguida são pesadas para avaliar o conteúdo de água restante, devolvidas à câmara e submetidas a níveis de pressão que variam de 3 a 150 mca (LIBARDI, 2005; DAVALO, 2013).

O método do funil de Haines é utilizado para obtenção da curva de retenção quando aplicadas tensões mais baixas (geralmente de 0 a 1,5 mca). Este, consiste num funil com placa porosa na parte inferior interna e a base ligada a um tubo flexível em formato de U para possibilitar variação de potencial em função da mudança de nível da extremidade do tubo. O espaço abaixo da placa e o tubo flexível são preenchidos com água, de preferência destilada. A amostra indeformada é colocada dentro do funil sobre a placa porosa para iniciar o processo de saturação por capilaridade, que ocorre elevando o tubo para gerar uma diferença de nível e possibilitar passagem da água pela placa porosa (previamente saturada) até formar uma coluna de água até $\frac{1}{3}$ da altura da amostra. A amostra saturada é pesada em balança de precisão e devolvida ao funil para que seja submetida a diferentes níveis de sucção com a diminuição da altura da extremidade do tubo flexível (cada 10 cm abaixo da amostra equivale a 0,1 mca). Após aplicada a tensão, a extremidade do tubo goteja até atingir o equilíbrio, para então pesar, devolver a amostra ao funil novamente e aumentar o potencial de sucção.

O método da mesa de tensão, diferentemente do funil de Haines, possibilita a aferição de várias amostras de maneira simultânea em um só equipamento, no entanto, também é limitado em termos de tensão aplicada. Esse método utiliza um recipiente com várias camadas de materiais porosos de baixa granulometria cobertos por um tipo de papel específico capaz de manter o contato hidráulico entre o material utilizado, a amostra e o tubo de água em sua base. A amostra é saturada e pesada para então ser colocada na mesa de tensão. Com o equipamento fechado para evitar evaporação, inicia-se o processo de aplicação da tensão até atingir o equilíbrio, identificado quando o

escorrimento de água cessa, para então ser novamente pesada e devolvida à mesa de tensão para ser submetida a outro nível de tensão. O procedimento se repete até que a amostra atinja o equilíbrio no último nível de pressão, para ser pesada e levada à estufa para secagem a 105 °C.

2.3.2 Condutividade hidráulica de solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado K_{sat} é uma das propriedades mais relevantes nos estudos da relação solo-água por estar relacionada com a velocidade com que a água se movimento no solo em estado de saturação. Os valores de K_{sat} variam muito de acordo com características de granulometria, densidade e porosidade (MESQUITA et al., 2004). Fato este, que explica a alta dispersão nos resultados em diferentes curtos espaçamentos de uma mesma área.

A determinação da K_{sat} pode ser realizada por métodos de campo e de laboratório. Tais métodos demandam uso de materiais adequados, bastante cuidado para não danificar as amostras e tempo para execução. Em laboratório, K_{sat} pode ser obtida através dos métodos de permeâmetro de carga constante ou de carga variável. O permeâmetro de carga constante exige a formação de uma coluna fixa de água sobre a amostra de solo para gerar um gradiente potencial. No permeâmetro de carga variável, como o próprio nome já deixa claro, o nível da carga hidráulica sofre alterações.

A determinação de K_{sat} pelo método do permeâmetro de carga constante é obtida pela aplicação direta da equação de Darcy-Buckingham (LIBARDI et al., 1980):

$$q = -K_{sat} \left(1 + \frac{h_2 - h_1}{\Delta Z} \right) \Rightarrow k_{sat} = -q \frac{\Delta Z}{\Delta Z + \Delta h} \quad (11)$$

em que, q (m dia⁻¹) é a densidade de fluxo de água no solo, Δh (m) é a diferença de potencial matricial da água no solo e ΔZ (m) o gradiente gravitacional.

Um método considerado complementar ao permeâmetro de carga constante é o método do permeâmetro de carga variável, que permite a determinação de K_{sat} por um sistema de carga hidráulica decrescente. Esse, por sua vez, é indicado para solos cujo valor da K_{sat} é menor (LIBARDI et al., 1980). No entanto, se trata de um método mais rápido em sua execução. Este método também é derivado de uma aplicação direta da lei

de Darcy-Buckingham (LIER, 2020; LIBARDI, 2005). Outros métodos de laboratório podem ser utilizados para obtenção da K_{sat} , e como não são o foco deste trabalho as descrições desses podem ser encontradas nos trabalhos de LIBARDI et al. (1980), MESQUITA et al. (2004) e HILLEL et al. (2014).

2.3.3 Funções de Pedotransferência

A determinação da K_{sat} e da CR exige muito tempo para execução em métodos de campo ou de laboratório, além de muitas vezes ter um custo elevado. No entanto, existem funções capazes de correlacionar K_{sat} e parâmetros da CR com informações mais facilmente obtidas. Estas funções são denominadas funções de pedotransferência (FP), (SILVA et al., 2018; MICHELON et al., 2010).

Programas computacionais foram desenvolvidos embasados em funções de pedotransferência como alternativa para obtenção de informações hidráulicas do solo como a CR e a K_{sat} . O RETC (van Genuchten et al., 1991) é um programa que pode ser usado para obtenção da CR. Este faz uso de FP para gerar previsões dos parâmetros de acordo com conteúdo de água no solo em diversos valores de potencial da água no solo (van Genuchten, 1980). O programa Rosetta (Schaap et al., 2001) pode ser usado para obtenção da K_{sat} com informações de granulometria, densidade e valores de umidade do solo em algumas tensões preestabelecidas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Solo

O solo de estudo é classificado como Latossolo Amarelo coeso argissólico de textura média/argilosa. As amostras de solo foram coletadas da área experimental do Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia (LIA) do CECA/UFAL, localizado no município de Rio Largo – AL.

As amostras de solo indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos com 5 cm de diâmetro e altura de 2,65 cm (volume de 52,03 cm³), com utilização de um trado para amostra indeformada (SONDATERRA^R). As amostras foram retiradas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm com 4 repetições para cada profundidade para determinação de K_{sat} e 2 repetições para curva de retenção.

Dados de textura do solo, densidade do solo, porosidade e conteúdo de água do solo nas tensões de 33 kPa e 1500 kPa foram obtidos previamente no Laboratório de Irrigação e Salinidade da Universidade Federal de Campina Grande – PB.

3.2 Curva de Retenção – Funil de Haines

A curva de retenção CR da água no solo foi determinada pelo método do funil de Haines e pelos pares de θ - h obtidos pelo método da Câmara de Richards. No método do funil de Haines, a amostra indeformada com papel filtro em sua base (Almeida et al., 2015) foi colocada dentro do funil sob a placa porosa e saturada por capilaridade. Para evitar perda de umidade por evaporação, o funil foi coberto com papel laminado, e para garantir a saturação, as amostras ficaram com uma coluna de água até a metade de sua altura num período de 48 horas. Logo após as amostras saturadas foram pesadas ($h = 0$ mca) e devolvidas ao funil para que fossem submetidas a dez diferentes tensões que variaram de 0 a 1,31 m. Ao finalizar essas medições, as amostras foram colocadas em estufa a 105 °C durante 24 horas para obtenção da massa de solo seca.

O modelo de CR utilizado foi o modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi h)^n]^m} \quad (12)$$

em que θ_r é a umidade residual, θ_s a umidade da amostra saturada, Ψh a tensão aplicada (potencial mátrico), α , n e m os parâmetros utilizados nos ajustes. O ajuste dos parâmetros da eq. (12) aos pares θ - h foi feito através do software RETC (van Genuchten

et al., 1991). Este utiliza um método de otimização de mínimos quadrados não-linear e possibilita a escolha de condições para que haja um melhor ajuste de CR. Neste trabalho, usou-se a condição $m=1-1/n$ de Mualem e van Genuchten (van Genuchten, 1980; Mualem, 1976).

Os parâmetros gerados pelo RETC (θ_r , θ_s , α , e n) foram utilizados no ajuste de CR com utilização dos dados do funil de Haines. Informações de umidade do solo pelo método da câmara de Richards foram utilizadas para ajustar a curva e os parâmetros em tensões mais altas (até 150 m).

3.3 Condutividade Hidráulica de solo Saturado K_{sat}

A condutividade hidráulica do solo saturado K_{sat} foi obtido pelo método de permeâmetro de carga constante (Figura 1) no LIA. Após a coleta e saturação das amostras indeformadas (mesmo procedimento e dimensões de anel do funil de Haines), anéis cilíndricos vazios, com as mesmas dimensões, foram acoplados acima das amostras com auxílio de fita adesiva impermeável a fim de possibilitar a formação de uma carga hidráulica acima do solo. Além disso, adicionou-se tecido suede na parte superior e inferior dos anéis com o objetivo de evitar a danificação das amostras e perda de solo. A saturação do solo foi feita por capilaridade em bandejas com água destilada. Após a saturação, as amostras foram colocadas em funis, para a coleta do fluxo de água do solo e imediatamente conectadas a um sistema de Mariotte para manutenção de uma carga hidráulica constante e igual a $2/3$ da altura da amostra do solo.

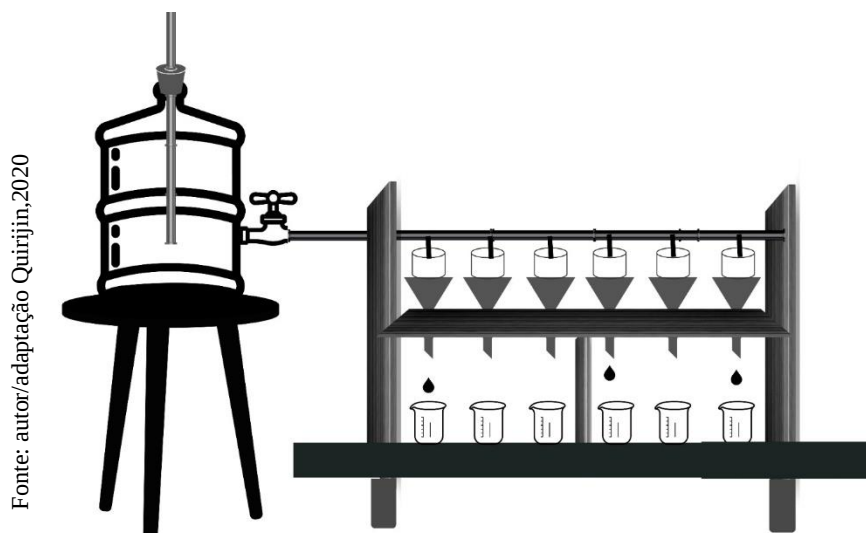


Figura 1: permeômetro de carga constante por sistema de Mariotte.

No método do permeômetro de carga constante, a K_{sat} foi calculada através da equação de Darcy. No entanto, a K_{sat} também foi estimada pelo programa Rosetta, que

faz uso de funções de pedotransferência. A simulação pelo programa procedeu com combinações de dados de granulometria, densidade e conteúdo de água no solo (CA) sob diferentes tensões.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curva de Retenção

O ajuste da equação de Van Genuchten, somente com os dados obtidos pelo método do funil de Haines, apresentou elevados valores de r^2 (Figura 2) para ambas as camadas: 0-10 cm (A1 e A2) e 10-20 cm (A3 e A4). Isto indica que o modelo de van Genuchten ajustados somente com os dados do Funil de Haines apresentou precisão alta para faixa húmida da CR. A amostra A4, diferentemente da amostra A3 (mesma profundidade), apresentou valores de conteúdo de água (θ) mais elevado. Possivelmente, ocorreu uma leve compactação da amostra (Marques et al., 2004). Note também (Tabela 1) que os valores do parâmetro α variaram substancialmente entre as duas camadas. Enquanto, os demais parâmetros apresentaram uma pequena variação.

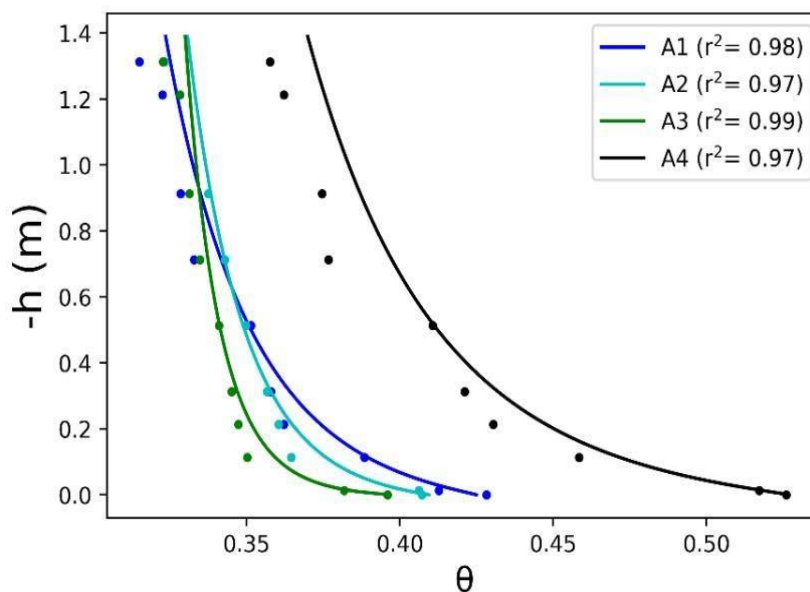


Figura 2: curva de retenção representada pela equação de Van Genuchten e ajustada pelo programa RETC utilizando-se os dados obtidos no método do funil de Haines para duas camadas do solo 0-10 cm (A1 e A2) e 10-20 cm (A3 e A4).

A CR obtida pelo ajuste da equação de Van Genuchten utilizando-se os dados do funil de Haines e da câmara de Richards é comparada com a CR obtida somente com os dados do funil de Haines na Figura 3. Observa-se que as curvas pelo método do funil de Haines se ajustam melhor aos dados iniciais (com baixa tensão). Por outro lado, não se ajustam bem com tensões acima de 1,4 m. Embora o r^2 é inferior quando se utiliza os

dados de ambos os métodos, a curva é mais realista, de acordo com a descrição na literatura (ASSOULINE et al., 1998; MARQUES et al., 2004; CÁSSARO et al., 2008). Além disso, note que, ajustando-se a curva somente com os valores da faixa úmida, proporciona erros substanciais da umidade solo, para valores baixos do potencial matricial do solo.

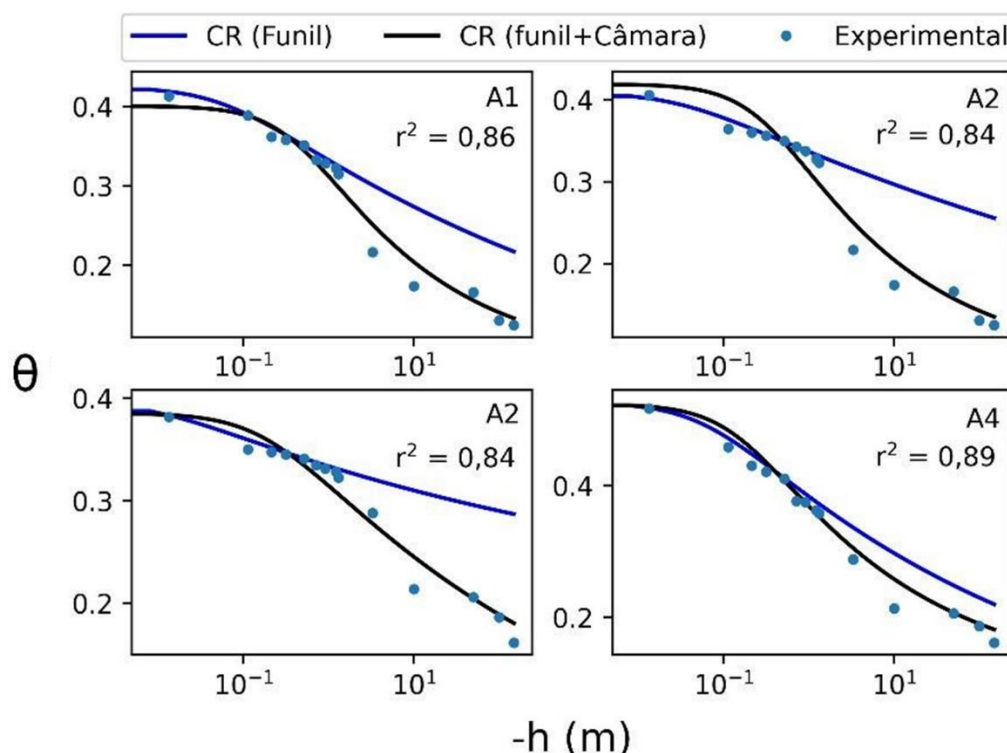


Figura 3: curva de retenção representada pela equação de van Genuchten e ajustada pelo programa RETC utilizando-se os dados obtidos somente pelo método do funil de Haines e com a utilização dos dados obtidos do funil de Haines e câmara de Richards (funil + Câmara) para duas camadas do solo 0-10 cm (A1 e A2) e 10-20 cm (A3 e A4).

Com relação aos valores dos parâmetros do modelo de van Genuchten, observa-se que o parâmetro que mais sofreu variação quanto ao método utilizado (Funil de Haines ou combinação de Funil de Haines + Câmara de Richards) foi o α . O parâmetro α está relacionado com o formato da CR. Outro ponto importante a ser observado é que o RETC não foi capaz de gerar um intervalo de confiança do valor de θ_r obtido com dados somente do funil de Haines, de modo que qualquer valor dentro do domínio de θ_r não influencia no ajuste. Assim, utilizando-se somente os dados do Funil não é possível gerar valores de θ_r .

Tabela 1: parâmetros da equação de van Genuchten obtidos pelo software RETC com dados do funil de Haines. A1 e A2 são amostras das camadas de 0-10 cm; A3 e A4 são amostras das camadas de 10-20 cm; θ_s é a umidade da amostra saturada; θ_r é a umidade residual; α , n e m são parâmetros utilizados nos ajustes.

Amostras	Parâmetros Funil				
	θ_s	θ_r	α	n	m
A1	0,4250	0	21,5266	1,0856	0,0788
A2	0,4096	0	41,2693	1,0552	0,0523
A3	0,3964	0,1838	151,9647	1,0748	0,0696
A4	0,5270	0	22,5131	1,1121	0,1008

Tabela 2: parâmetros da equação de van Genuchten obtidos pelo software RETC com dados do funil de Haines e câmara de Richards. A1 e A2 são amostras das camadas de 0-10 cm; A3 e A4 são amostras das camadas de 10-20 cm; θ_s é a umidade da amostra saturada; θ_r é a umidade residual; α , n e m são parâmetros utilizados nos ajustes.

Amostras	Parâmetros Funil + Câmara de Richards				
	θ_s	θ_r	α	n	m
A1	0,4194	0,0720	4,5212	1,2758	0,2162
A2	0,4007	0,0711	3,1326	1,2824	0,2202
A3	0,3858	0	6,3396	1,1141	0,1024
A4	0,5240	0,0914	10,0472	1,2281	0,1857

4.2 Condutividade Hidráulica Saturada do Solo K_{sat}

A Tabela 3 observa-se K_{sat} determinado pelo método do permeâmetro de carga constante para as profundidades de 0-10 e 10-20 cm e estimados pelo software Rosetta para profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm (P1, P2, P3 e P4), utilizando os seguintes dados de entrada: i) as combinações de dados de granulometria e densidade do solo (G.D), ii) granulometria, densidade do solo e umidade do solo a 33 kPa (G.D + 33 kPa) e iii) granulometria, densidade do solo e umidade do solo nas tensões de 33kPa e 1500 kPa (G.D + 33 kPa + 1500 kPa). Comparando-se os valores de K_{sat} , é possível observar que em P1 o valor de K_{sat} obtido experimentalmente pelo método do permeâmetro de carga constante está mais próximo ao valor estimado com os dados de granulometria e densidade do solo, sendo substancialmente diferente dos valores obtidos

com utilização das demais variáveis. Para a camada P2, a K_{sat} obtida pelo ROSETTA superestimou o valor obtido pelo permeâmetro em todos os casos, não apresentando um padrão definido quanto aos métodos de estimativa. Desta forma, o uso do ROSETTA mostrou-se inapropriado para a determinação da K_{sat} para as camadas de solo analisadas neste trabalho. Este resultado deve-se ao fato de que o ROSETTA é baseado em funções de pedotransferências obtidas a partir de solos de clima temperado. A utilização de funções de pedotransferência obtidas para solos do Brasil pode ser uma alternativa ao uso do ROSETTA.

Tabela 3: Condutividade Hidráulica Saturada do Solo K_{sat} determinada pelo método do permeâmetro de carga constante e estimada pelo programa ROSETTA. K_{sat} P. é a condutividade hidráulica saturada pelo método do permeâmetro de carga constante; G.D representa granulometria + densidade; Tensão (kPa); P1, P2, P3 e P4 são as profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm respectivamente.

Profundidade	K_{sat} (cm d ⁻¹)			K_{sat} P (cm d ⁻¹)
	G.D	G.D+33 kPa	G.D+33 kPa+1500 kPa	
P1	87,6	410,3	334,6	86,97
P2	94,8	307,2	269,1	15,55
P3	23,6	36,1	32,4	-
P4	63,5	191	128,1	-

5. CONCLUSÕES

Embora o ajuste da equação de van Genuchten aos dados obtidos somente pelo método do funil de Haines apresente elevada precisão, a curva gerada pelo ajuste, assim como os parâmetros obtidos, não representa adequadamente a curva de retenção de água do solo. Dessa forma, o ajuste utilizando-se os dados do funil de Haines em combinação com os dados deve ser utilizado.

O programa Rosetta utilizando-se dados de granulometria e densidade do solo pode apresentar uma estimativa da condutividade hidráulica saturada do solo para a camada de 0-10 cm do solo estudado. No entanto, não promove estimativa adequada para a camada de 10-20 cm.

6. REFERÊNCIAS

BUDIMAN, Minasny et al. Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.

COLLARES, Gilberto Loguercio et al. Retenção de água medida pelo método de placas porosas de Richards e pelo psicrômetro de termopar. REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, v. 14, 2002.

DAVALO, Marcelo Jara. Curva de retenção de água no solo estimado pelo método da câmara de Richards e psicrômetro. 2013.

DURIGON, Angelica; JONG VAN LIER, Quirijn de. Determinação das propriedades hidráulicas do solo utilizando tensiômetros de polímeros em experimentos de evaporação. Revista brasileira de ciência do solo, v. 35, p. 1271-1276, 2011.

HILLEL, Daniel. Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations. Elsevier Science, 2014.

Jong Van Lier, Quirijn. Física do solo - baseada em processos / editado por Quirijn de Jong Van Lier. - Piracicaba: Edição do autor, 413 p.: il., 2020.

LIBARDI, P. L. et al. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. Soil science society of America journal, v. 44, n. 1, p. 3-7, 1980.

LUCAS, Juliana Fenner Ruas et al. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 35, p. 1957-1973, 2011.

MARQUES, Jean Dalmo de Oliveira et al. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com

diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. *Acta Amazonica*, v. 38, p. 193-206, 2008.

MELO FILHO, José F. de; DO SACRAMENTO, José AAS; CONCEIÇÃO, Bruna PS. Curva de retenção de água elaborada pelo método do psicômetro para uso na determinação do índice "S" de qualidade física do solo. *Engenharia Agrícola*, v. 35, p. 959-966, 2015.

MESQUITA, Maria da Glória Bastos de Freitas; MORAES, Sergio Oliveira. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, v. 34, p. 963-969, 2004.

MICHELON, Cleudson Jose et al. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, v. 40, p. 848-853, 2010.

RAMOS, Tiago et al. Propriedades hidráulicas do solo para as diferentes classes texturais. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 34, n. 2, p. 252-264, 2011.

RAMOS, Tiago B. et al. Comparação de diferentes funções de pedotransferência para estimar as propriedades hidráulicas dos solos em Portugal. *Livro de Actas do Encontro Anual da Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo*, v. 26, p. 29-34, 2014.

REECE, Clive F. Evaluation of a line heat dissipation sensor for measuring soil matric potential. *Soil Science Society of America Journal*, v. 60, n. 4, p. 1022-1028, 1996.

SCHAAP, Marcel G.; LEIJ, Feike J.; VAN GENUCHTEN, Martinus Th. Rosetta: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of hydrology*, v. 251, n. 3-4, p. 163-176, 2001.

SILVA, Alessandra Calegari; ARMINDO, Robson André. Importância das funções de pedotransferência no estudo das propriedades e funções hidráulicas dos solos do Brasil. *Multi-Science Journal*, v. 1, n. 5, p. 31-37, 2016.

SILVA, A. C.; ARMINDO, R. A. Importância das funções de pedotransferência no estudo das propriedades e funções hidráulicas dos solos do brasil. *Multi-Science Journal*, [S. l.], v. 1, n. 5, p. 31–37, 2018.

SOBIERAJ, J. A.; ELSENBEER, H.; VERTESSY, R. A. Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity: implications for modeling storm flow generation. *Journal of Hydrology*, v. 251, n. 3-4, p. 202-220, 2001.

YOUNG, Donald R.; NOBEL, Park S. Predictions of soil-water potentials in the north-western Sonoran Desert. *The Journal of Ecology*, p. 143-154, 1986.