



DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE UM LATOSSOLO DO CERRADO

DETERMINATION OF THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY FUNCTION OF A CERRADO OXISOL

M. C. MELO^{1*}, L. M. GUIMARÃES², E. L. MELO², P. C. SILVA² e L. C. D. DRUMOND¹

¹ Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Agrárias, Rio Paranaíba, MG, Brasil

² Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Rio Paranaíba, MG, Brasil

*Autor correspondente: Instituto de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Viçosa, Campus de Rio Paranaíba, Rio Paranaíba – MG, Brasil, Fone: +55 34 38559334

Endereço de e-mail: mariana.c.melo@ufv.br.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2018-05-04

Accepted 2018-08-01

Available online 2018-08-05

palavras-chave

Condutividade hidráulica

Curva de retenção de água no solo

Papel filtro

Permeâmetro de Guelph

Irrigação

keywords

Hydraulic conductivity

Soil retention curve

Paper filter

Guelph Permeameter

Irrigation

RESUMO

O estudo dos solos não saturados tem aplicação direta no uso racional da água, sendo essenciais em projetos e manejo da irrigação. Objetivou-se neste trabalho, determinar a função de condutividade hidráulica dos solos (FCH) pelo método indireto ajustada pelo modelo de Van Genuchten-Mualem para um latossolo da região do Alto Paranaíba. A FCH foi obtida por meio da curva de retenção de água nos solos (CRA) pela técnica do papel filtro e a condutividade hidráulica saturada do solo (K_{sat}) através do permeâmetro de Guelph, em 5 pontos e duas profundidades (0,2-0,4; 0,4-0,6 m). As CRA's possuem comportamento bimodal devido a macro e microporosidade deste solo. Os valores de K_{sat} foram condizentes aos encontrados na literatura. As CRA's e K_{sat} não apresentaram variabilidade entre os pontos e profundidades, mostrando a boa homogeneidade física deste latossolo ao longo do perfil do solo. A FCH ajustou-se bem ao modelo, sendo o primeiro trecho da CRA (0-8000 kPa) suficiente em projetos de irrigação.

ABSTRACT

The study of unsaturated soils has direct application in the rational use of water, being essential in irrigation projects and management. The objective of this work was to determine by indirect method the hydraulic conductivity of soils (HCS) adjusted by the Van Genuchten-Mualem model for a oxisol of the Alto Paranaíba region. A HCS was obtained by means of the soil water retention curve (SWR) by the filter paper technique and the saturated hydraulic conductivity of the soil (K_{sat}) through the Guelph permeameter, in 5 points and two depths (0,2-0,4; 0,4-0,6 m). The SWR's have bimodal behavior due to macro and microporosity of this soil. The K_{sat} values were consistent with those found in the literature. The SWR's and K_{sat} did not show variability between the points and depths, showing the good physical homogeneity of this oxisol along the soil profile. The HCS adjusted well to the model, being the first stretch of SWR (0-8000 kPa) sufficient in irrigation projects.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos para compreensão e predição do fluxo de água no solo são fundamentais para a solução de problemas e melhorias de técnicas que envolvem a irrigação, com aplicação direta na otimização do uso da água e conseqüentemente na interação solo-água-planta. A capacidade da água em se movimentar no perfil do solo com a diminuição do teor de umidade é chamada de função de condutividade hidráulica (FCH) e ocorre em condições naturais à medida que poros ocupados por água são substituídos por ar. Segundo McCartney (2007), três variáveis podem ser usadas para caracterizar o comportamento hidráulico dos solos não saturados: o teor de umidade volumétrico, a matriz de sucção (diferença entre a pressão de ar e água), e a resistência que a água encontra para atravessar a camada de solo, dado pelo coeficiente de permeabilidade K . A partir da FCH pode-se calibrar tensiômetros e realizar modelagens do movimento de água no solo para predição do sistema solo-água-planta-atmosfera.

A relação entre o teor de umidade volumétrico e a matriz de sucção é chamada de curva característica do solo ou curva de retenção de água (CRA). A CRA é dependente das propriedades do solo, como granulometria, teor de matéria orgânica e composição mineralógica, de condições como volume e distribuição dos vazios, micro e macroestrutura, microfissuras, pH, composição da fase líquida, temperatura, dentre outros. Segundo Marinho (2005), muitas críticas podem ser feitas, pois a curva em questão não é somente uma característica do solo ou do material poroso, pois depende de fatores como história de tensões e das trajetórias de drenagem (ou secagem) e umedecimento seguidas durante a variação de umidade. Na descrição do comportamento físico-hídrico de solos nessas condições, o modelo de ajuste proposto por van Genuchten (1980) tem sido amplamente utilizado e permite relacionar com ótima precisão o teor de umidade volumétrico (relação entre volume de água e volume total) e a sucção correspondente. Essa equação matemática é caracterizada por apresentar duas assíntotas, relacionadas com os conteúdos de água no solo correspondentes à saturação (θ_s) e ao conteúdo residual (θ_r) e um ponto de inflexão entre os platôs, o qual é dependente dos atributos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (" α ", " n " e " m ").

A relação entre o teor de umidade volumétrico e o coeficiente de permeabilidade é dado como função de condutividade hidráulica (FCH), as quais, podem ser apresentadas em função da sucção, saturação, teor de umidade volumétrico ou até mesmo em função da saturação efetiva. Solos com textura mais grossa apresentam funções nas quais a taxa de decréscimo da condutividade hidráulica é bem maior do que a dos solos com textura mais fina, uma vez que os poros maiores drenam mais facilmente que os menores, reduzindo a área efetiva de drenagem e diminuindo a condutividade hidráulica mais rapidamente.

A determinação da FCH é realizada através de técnicas diretas ou indiretas. As medidas diretas são geralmente feitas por meio de ensaios de permeabilidade desenvolvidos em laboratório e/ou ensaios de campo. Já as medidas indiretas

utilizam o coeficiente de permeabilidade saturada (K_{sat}) e a CRA do solo (FREDLUND E RAHARDJO, 1993). Em decorrência das dificuldades encontradas na determinação da função de condutividade por meios diretos devido a demanda de tempo e a necessidade de equipamentos especiais que oneram custos, muitas pesquisas têm sido direcionadas para desenvolver procedimentos semi-empíricos, ou indiretos, que determinam a FCH usando a CRA (GARDNER 1958; BROOKS E COREY, 1964; van GENUCHTEN, 1980; FREDLUND et al., 1994).

Diante da necessidade de otimização do manejo da irrigação para predição da quantidade real de água necessária às plantas e conhecimento do movimento de água ao longo do perfil do solo, este trabalho teve como objetivo, determinar pelo método indireto a função de condutividade hidráulica dos solos (FCH) ajustada pelo modelo de Van Genuchten-Mualem para um latossolo da região do Alto Paranaíba.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na área experimental da Universidade Federal de Viçosa – *Campus* Rio Paranaíba, MG, nas coordenadas 19° 12' 43" S e 46° 07' 56" W, com altitude média de 1128 m. O clima da região é classificado como Cwb, segundo Köppen, com estações de inverno e verão bem definidas, chuvas no verão e temperatura média do ar no mês mais quente maior que 22°C. O solo da região é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado, textura argilosa, fase cerrado, relevo plano e suave ondulado (EMBRAPA, 2006). Foram realizados ensaios para obtenção da CRA e do K_{sat} em cinco pontos aleatórios nas profundidades de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m em uma área de 10.000 m². Amostras desse solo também foram utilizadas para conhecimento de sua textura, sendo realizada através do ensaio de granulometria conjunta segundo as normas ABNT NBR-7181/84.

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) do solo foi determinada em campo por meio do permeâmetro de Guelph, utilizando os métodos por uma e por duas cargas hidráulicas. O cálculo da K_{sat} e do Potencial de fluxo matricial Φ_m são obtidos através da determinação do valor da taxa de infiltração e da associação deste valor com as dimensões do furo e da altura da coluna d'água em seu interior. A Equação 1 é apresentada para obtenção do K_{sat} com uma carga hidráulica.

$$K_{sat} = \frac{CQ}{2\pi H^2 + \pi P^2 C + \frac{2\pi H}{\alpha}} \quad (1)$$

onde K_{sat} corresponde à condutividade hidráulica saturada [cm/s], C o parâmetro fator de forma, o qual depende do raio do poço [$P=3$ cm], da altura da carga hidráulica [$H=5$ cm] e da macroporosidade e textura do solo, Q a vazão do regime permanente dada por $Q = R \times A$, sendo R a taxa de infiltração e A a área do reservatório [conforme reservatório utilizado externo/interno= 35,10 cm² e interno 2,14 cm²], P igual ao raio do poço [$P=3$ cm] e α correspondendo ao parâmetro estimado por avaliação visual in situ da macro porosidade e textura do solo [$\alpha = 0,12$ cm⁻¹].

Para procedimentos de ensaio com duas cargas hidráulicas com uso de água dos reservatórios interno/externo, tem-se a Equação 2.

$$k_{sat} = (0,0041 * X * R_2) - (0,0054 * X * R_1) \quad (2)$$

onde Ksat corresponde a condutividade hidráulica saturada [cm/s], R1 e R2 a taxa de infiltração corresponde às alturas H1 e H2 respectivamente [cm/s], X a constante do reservatório, usada quando a combinação de reservatório interno/externo é selecionada, [X=35,10 cm²], como mostra a Equação 3.

$$\Phi_m = (0,0572 * Y * R_2) - (0,0237 * Y * R_1) \quad (3)$$

em que Φm é o potencial de fluxo matricial [cm²/s], R2 e R1 a taxa de infiltração corresponde às alturas H1 e H2 respectivamente [cm/s] e Y a constante do reservatório, usada quando a combinação de reservatório interno/externo é selecionada [Y=2,14 cm²].

As curvas de retenção de água no solo (CRA) foram determinadas em cada ponto utilizando-se a técnica do papel filtro, ensaio padronizado pela ASTM D-5298 (*Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper*). Para retirar as amostras indeformadas, foram confeccionados anéis em PVC com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, em média. Os anéis foram biselados para facilitar a cravação. Foram retiradas entre 10 e 14 amostras por profundidade. Foram obtidos os teores de umidade e massa úmida, o que possibilitou a determinação da porosidade, grau de saturação e peso específico seco. Foi utilizado o papel filtro Whatman n° 42. As CRAs foram obtidas por meio de secagem, onde todas as amostras são umedecidas até saturação completa e expostas as condições ambientais para secagem, até o valor de saturação desejado, calculado previamente mediante os índices físicos e controlado por pesagens sucessivas. Os papéis filtro foram colocados cuidadosamente na superfície superior e outro na inferior de cada corpo de prova e imediatamente após o posicionamento dos papéis filtro, envolveu-se o corpo de prova com filme plástico. Em seguida, os corpos de prova foram identificados e deixados em câmara úmida por 7 dias. Posteriormente, os corpos de prova foram abertos para determinação do teor de umidade do papel filtro, primeiramente pesando-o e depois submetendo-o a estufa, por um período de 2 horas, a uma temperatura de 105°C. Cada valor de sucção calculado foi determinado pela média de três resultados.

Calculado o teor de umidade do papel filtro, a sucção matricial do solo foi determinada utilizando as curvas de calibração do papel filtro Whatman n° 42, obtidas por Chandler et al. (1992), apresentadas nas Equações 4 quando as umidades dos papéis filtro eram superiores à 47% e Equação 5 quando as umidades dos papéis filtro eram menores ou iguais à 47%.

$$\psi (kPa) = 10^{(6,05 - 2,48 \log w)} \quad (4)$$

$$\psi (kPa) = 10^{(4,84 - 0,0622 w)} \quad (5)$$

sendo Ψ a sucção matricial do solo [kPa] e w a umidade do papel filtro [%].

O modelo de van Genuchten (1980) foi escolhido para o ajuste aos pontos experimentais sendo apresentado na Equação 6. Os parâmetros α, m, n foram obtidos por otimização, minimizando-se a diferença entre os resultados experimentais e teóricos, como mostra a Equação 7, utilizando-se, para isso, a ferramenta Solver do programa Excel.

$$\theta_w(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha \times \psi)^n)^m} \quad (6)$$

$$\text{Diferença (\%)} = \frac{\sqrt{(\theta_1 - \theta_c)^2 + (\theta_1 - \theta_c)^2 + (\theta_1 - \theta_c)^2 + \dots}}{\sqrt{\theta_c^2 + \theta_c^2 + \theta_c^2 + \dots}} \quad (7)$$

em que Ψ corresponde a sucção matricial [kPa], θw o teor de umidade volumétrica [cm³/cm³], θs o teor de umidade volumétrica de saturação [cm³cm⁻³], θr o teor de umidade volumétrica residual [cm³cm⁻³], α o parâmetro de ajuste da curva [cm⁻¹], n e m parâmetros de ajuste cuja relação é m=1-1/n, θ1 o teor de umidade volumétrico obtido em laboratório e θc o teor de umidade volumétrico calculado pelo modelo.

O valor do teor de umidade volumétrico obtido em laboratório foi calculado pela Equação 8.

$$\theta_1 = \frac{Sr \times e}{1 + e} \quad (8)$$

onde Sr: grau de saturação e e correspondendo ao índice de vazios.

Em razão do comportamento bimodal de alguns solos, têm sido propostas modelagens utilizando-se equações capazes de identificar esse comportamento, em que essas classes de poros são quantificadas por meio de dois pontos de máximo, obtidos a partir da derivação da curva de retenção de água (DEXTER et al., 2008) e conseqüentemente, dois pontos de inflexão, como apresentado na Figura 1.

Observa-se na Figura 1 algumas características da curva, sendo θs1 o teor de umidade volumétrica de saturação da curva 1, θs2 o teor de umidade volumétrica de saturação da curva 2, θr1 o teor de umidade volumétrica residual da curva 1 (valor igual ao θs2), θr2 o teor de umidade volumétrica residual da curva 2, θi, mi e ni sendo os parâmetros de ajustes das curvas 1 e 2.

Com os resultados obtidos experimentalmente, foi determinada a função de permeabilidade pelo ajuste da curva de van Genuchten-Mualen por meio da Equação 9. Os dados de entrada são o coeficiente de permeabilidade saturada obtida em campo (Ksat) e os valores α, m e n obtidos pela curva de retenção.

$$K(\Psi) = k_s \times \frac{[1 - (\alpha \Psi)^{n-1}] \times (1 + (\alpha \Psi)^n)^{-m}]^2}{[(1 + \alpha \Psi)^n]^{\frac{2}{n}}} \quad (9)$$

onde Ks é a condutividade hidráulica na condição saturada [cm/s], α, m e n os parâmetros para ajuste da CRA.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas granulométricas dos cinco pontos amostrais são apresentadas na Figura 2. O teor de argila, silte e areia foram em média respectivamente iguais a 70%, 18% e 12%. Pode-se observar que a textura deste solo é predominantemente composta por materiais finos, o que o caracteriza como argiloso. Camargo e Pires (2015) caracterizaram uma área próxima e encontraram material variando de 62% a 85% de material fino.

A condutividade hidráulica saturada (Ksat) é apresentada na Tabela 1. Pode-se observar que este solo é bastante permeável, na ordem de 5,0E-3 cm/s, tanto para o método de um estágio, quanto para o de dois estágios.

Valores negativos são comumente encontrados nos ensaios de dois estágios. De acordo com Soto et al. (2009), esses resultados são causados pela heterogeneidade ou macroporosidade no meio poroso, resultando em características de fluxo diferentes, entre um e outro estágio de medição. Soto et al. (2009), analisaram o método do permeâmetro Guelph em

um solo arenoso e outro argiloso, empregando os métodos de um e dois estágios. Eles evidenciaram dificuldades em cumprir a condição de isotropia de Ksat no método de dois estágios, porém destacaram que com o uso desta técnica torna-se possível a minimização de erros operacionais.

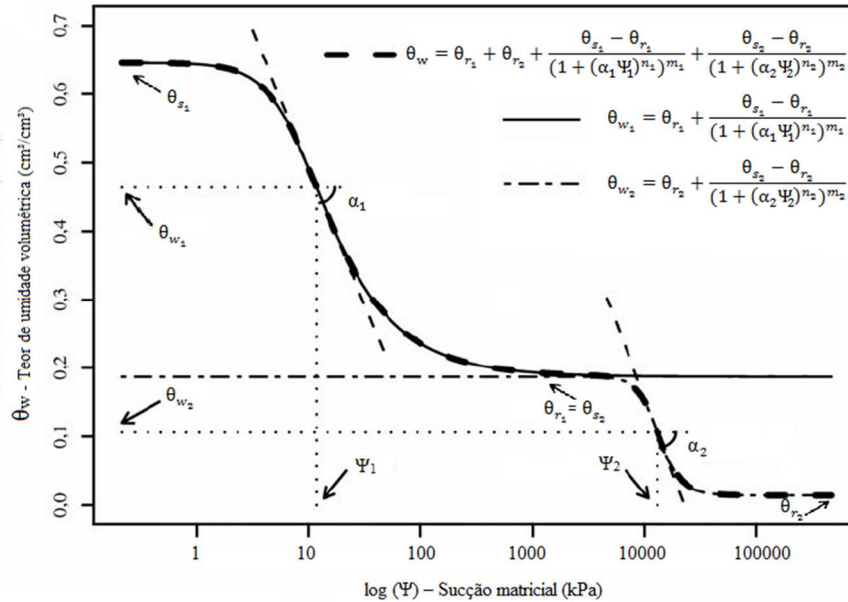


Figura 1 - Modelo sugerido de ajuste da função duplo van Genuchten para a CRA, com as localizações dos parâmetros associados ao modelo, sendo potencial matricial (ψ) e conteúdo de água (θ_{wi}) com a estimativa da primeira e segunda inclinação nos pontos de inflexão. Fonte: Adaptado de Carducci et al. (2011).

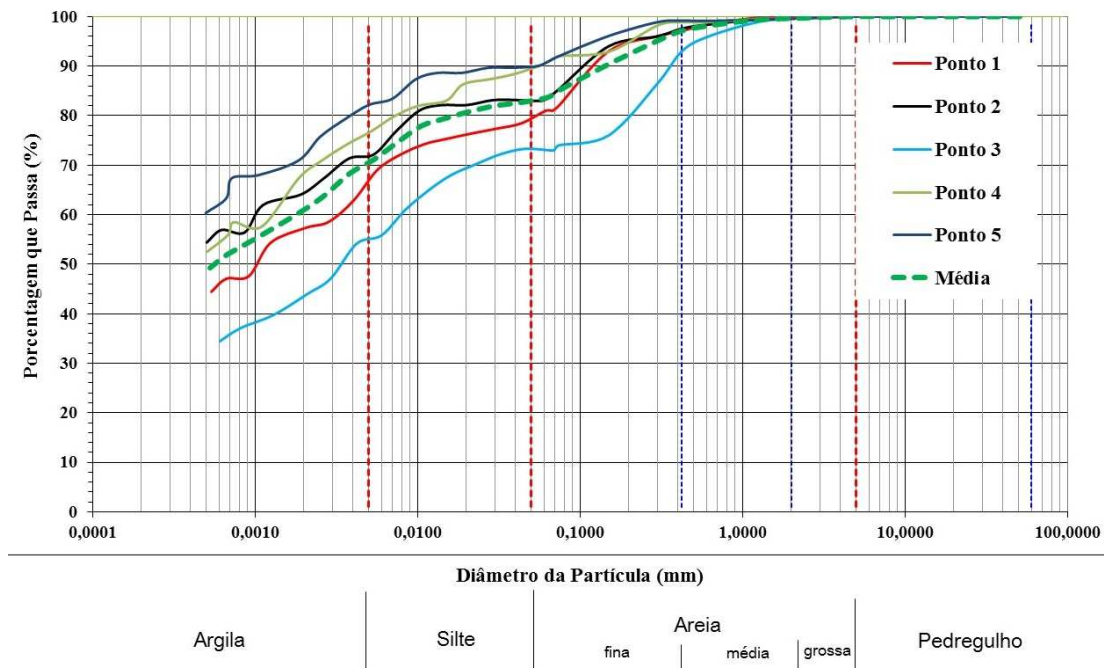


Figura 2 – Curvas granulométricas do solo.

Gonçalves e Libardi (2013) determinaram o Ksat pelo método do perfil instantâneo de um latossolo e obtiveram valores na ordem de 2,0E-4 cm/s. Sousa e Alves (2003) avaliaram o movimento de água de um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes manejos e encontraram o Ksat com

valores na ordem de 3,0E-3 cm/s entre as profundidades de 0 a 0,4 m. Netto e Fernandes (2005), determinaram a condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo e encontraram valores de Ksat na ordem de 1,0E-3 cm/s. Pode-se inferir que os resultados da Ksat deste trabalho

condizem com os resultados apresentados na literatura para um latossolo. A estrutura destes solos é composta de agregados com formato arredondado, sendo numerosos e distribuídos de maneira a deixarem grande quantidade de macro poros entre eles, o que proporciona uma maior permeabilidade à água, mesmo com elevados teores de argila.

Tabela 1 – Valores de Ksat pelos métodos de um e dois estágios.

Pontos	1 estágio (cm/s)		2 estágios (cm/s)	
	Profundidades (m)			
	0,2-0,4	0,4-0,6	0,2-0,4	0,4-0,6
1	1,8E-03	5,8E-03	2,0E-03	-2,8E-03
2	9,3E-04	4,3E-03	2,8E-03	-2,0E-03
3	3,1E-03	2,7E-03	2,0E-04	9,9E-03
4	5,6E-03	2,5E-02	-1,2E-03	-5,3E-02
5	3,5E-03	4,2E-03	2,6E-04	6,6E-04
Média	3,1E-03	4,3E-03	1,1E-03	5,3E-03

Gonçalves e Libardi (2013) determinaram o Ksat pelo método do perfil instantâneo de um latossolo e obtiveram valores na ordem de 2,0E-4 cm/s. Sousa e Alves (2003) avaliaram o movimento de água de um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes manejos e encontraram o Ksat com valores na ordem de 3,0E-3 cm/s entre as profundidades de 0 a 0,4 m. Netto e Fernandes (2005), determinaram a condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo e encontraram valores de Ksat na ordem de 1,0E-3 cm/s. Pode-se inferir que os resultados da Ksat deste trabalho condizem com os resultados apresentados na literatura para um latossolo. A estrutura destes solos é composta de agregados com formato arredondado, sendo numerosos e distribuídos de maneira a deixarem grande quantidade de macro poros entre eles, o que proporciona uma maior permeabilidade à água, mesmo com elevados teores de argila.

A Figura 3-A e 3-B apresentam as CRAs determinadas pelo método do papel filtro e ajustadas no modelo de Van Genuchten (1980). Pode-se verificar que as curvas obtidas possuem um comportamento bimodal. As CRA's foram geradas individualmente por ponto e por profundidade e os parâmetros necessários ao modelo de Van Genuchten (1980) podem ser consultados na Tabela 2. Na Tabela 3 são apresentados os resultados encontrados a partir dos valores médios por profundidade. Nas medidas de sucção tanto em laboratório como em campo pode-se ter uma série de dificuldades experimentais e comumente deve-se recorrer a diferentes técnicas de ensaio com intuito de se conhecer o potencial matricial dentro de uma faixa ampla, que seja suficiente para utilização prática.

Para fins de projetos de irrigação, Carducci et al. (2011), destaca que apesar de ser considerada indisponível às plantas, estudos visando quantificar a água residual retida nos solos tornam-se fundamentais, pois essa pode ser determinante na regulação de processos bioquímicos microbianos no solo, na reindução da tolerância à dessecação de sementes germinadas e plântulas quando submetidas a elevado potencial matricial ($\psi_m > 1.500$ kPa), além de poder atuar como agente lubrificante entre agregados, quando o solo é submetido a pressões externas durante as operações mecanizadas.

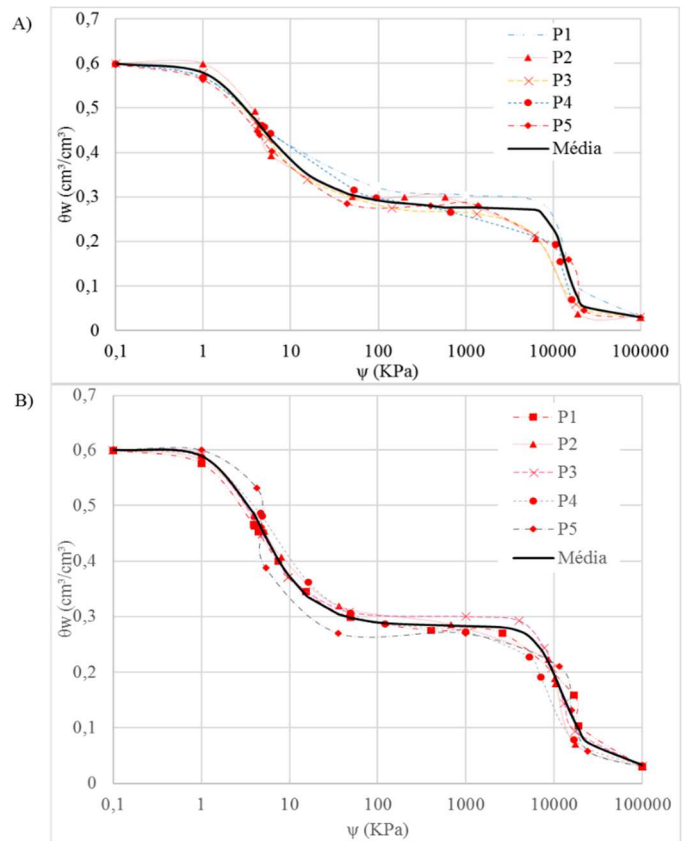


Figura 3 – CRA's nas profundidades A) 0,2-0,4 m e B) 0,4-0,6 m.

As CRA's de um latossolo estudado por Carducci et al. (2011), também apresentaram comportamento bimodal no intervalo de potencial matricial estudado. Nesse trabalho os pesquisadores abordam que os Latossolos do Cerrado, em função da mineralogia da fração argila e estrutura granular, apresentam elevado volume de poros grandes e de poros extremamente pequenos. A distribuição destes por tamanho é caracterizada por apresentar predominantemente duas classes distintas: a primeira, relacionada àqueles muito grandes, que promovem rápida drenagem interna do solo e a segunda, a poros muito pequenos, nos quais a água é retida com energia muito alta, caracterizando-a como água higroscópica (OLIVEIRA et al., 2004). O comportamento bimodal da curva de retenção de água no solo reflete essas classes de poros, em que o primeiro ponto de inflexão ocorre sob baixos potenciais matriciais (entre 1 e 50 kPa), ao passo que o segundo ponto ocorre sob potenciais muito altos (entre 8.000 e 20.000 kPa).

De acordo com Ferreira et al. (1999), em solos tropicais altamente intemperizados, os óxidos de ferro e de alumínio atuam como agentes cimentantes entre as partículas minerais, alterando o arranjo dos seus constituintes. Vollant-Tuduri et al. (2005) e Severiano, (2010), salientam que, micromorfologicamente os Latossolos apresentam a distribuição dos minerais em relação ao plasma, seguindo o padrão aglutinado, em agregados granulares muito pequenos (diâmetro < 300 µm), conferindo elevado índice de vazios, por sua vez, organizado em cavidades interconectadas.

A FCH apresentada na Figura 4 é relativa aos dados médios das CRA's nas profundidades 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m, os quais foram plotados em função do teor de umidade volumétrico. Os parâmetros utilizados foram obtidos na primeira inflexão da curva (Θ_{s1} , Θ_{r1} , Θ_1 , m_1 , n_1) e podem ser

consultados na Tabela 3. A pequena diferença existente entre as profundidades é explicada perante os diferentes valores de Ksat determinados, podendo-se verificar que os mesmos variaram muito pouco ao longo do perfil do solo.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros por pontos pelo modelo de Van Genuchten

	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4		Ponto 5	
	Profundidades (m)									
	0,2-0,4	0,4-0,6	0,2-0,4	0,4-0,6	0,2-0,4	0,4-0,6	0,2-0,4	0,4-0,6	0,2-0,4	0,4-0,6
θ_r 1	0,3000	0,2700	0,3000	0,2829	0,2626	0,3000	0,2467	0,2700	0,2800	0,2700
θ_s 1	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000	0,6000
α 1	0,4833	0,3918	0,2457	0,3333	0,3675	0,2919	0,4840	0,2670	0,2706	0,2032
n 1	1,6813	1,8198	3,6568	1,8676	1,8403	2,3661	1,5016	1,8469	2,8960	8,7145
m 1	0,4052	0,4505	0,7265	0,4645	0,4566	0,5774	0,3341	0,4586	0,6547	0,8853
θ_r 2	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300	0,0300
θ_s 2	0,3000	0,2700	0,3000	0,2829	0,2626	0,3000	0,2467	0,2700	0,2800	0,2700
α 2	0,0009	0,0000	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
n 2	5,1805	8,3038	4,3822	4,5520	3,5014	3,5127	6,5426	2,9389	7,4153	4,5963
m 2	0,8069	0,8795	0,7718	0,7803	0,7144	0,7153	0,8472	0,6597	0,8651	0,7824

Tabela 3 - Valores médios por profundidade pelo modelo de van Genuchten.

Parâmetros	Profundidades	
	0,2-0,4 m	0,4-0,6 m
θ_r 1	0,27636	0,28297
θ_s 1	0,60000	0,60000
α 1	0,36543	0,28720
n 1	1,83481	2,15993
m 1	0,45498	0,53702
θ_r 2	0,03000	0,03000
θ_s 2	0,27636	0,28297
α 2	0,00008	0,00010
n 2	5,04664	3,03627
m 2	0,80185	0,67065

Como as CRA's obtidas possuem comportamento bimodal, a FCH apresentada representa apenas o primeiro trecho na faixa de sucção apresentada (0-8000 kPa), sendo mais que suficiente para otimização de sistemas de irrigação, pois em geral, a sucção máxima utilizada para determinação da lâmina de água refere-se ao ponto de murcha permanente sendo estes valores próximos a 1500 kPa.

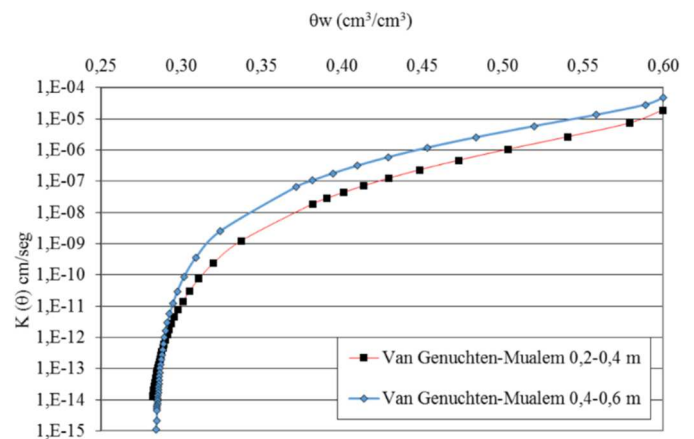


Figura 4 - Função de condutividade hidráulica a 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m.

4. CONCLUSÕES

A função de condutividade hidráulica do latossolo estudado, ajustada pelo modelo de Van Genuchten-Mualem e obtida indiretamente por meio da CRA e Ksat é relativa ao primeiro trecho da curva de retenção de água no solo, referente a sucção de 0-8000 kPa, sendo esta faixa suficiente para elaboração de projetos e manejo da irrigação, além de calibração de tensiômetros e modelagens do fluxo de água no solo.

As CRA's determinadas possuem comportamento

bimodal devido a macro e microporosidade deste solo e as Ksat não apresentaram variabilidade entre os pontos e profundidades estudadas, mostrando a boa homogeneidade física deste latossolo ao longo do perfil do solo e apresentando resultados condizentes à literatura para essa classe de solo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181/84. **Solo – Análise Granulométrica – Procedimento**. Rio de Janeiro, 13 p, 1984.
- ASTM D-5298-03. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter Paper**, 2003.
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous medium. **Hydrology Paper**, Colorado State University Fort Collins, v. 3. Mar. 1964.
- CAMARGO, D.P.; PIRES, M.V.O. **Confecção da carta de aptidão de fundações de acordo com a proposta metodológica elaborada por Zuquette (1987) para o Campus da UFV – Rio Paranaíba**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, MG, 2015.
- CARDUCCI, C.E.; DE 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 Ciências do Solo**, v.35, p. 77-86, 2011.
- CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the Institute of Civil Engineering**, v.92, p. 82-89, 1992.
- DEXTER, A.R.; CZY, 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, p. 243-253, 2008.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006.
- FERREIRA, M.M.; FERNADES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n. 3, p. 515-524, 1999.
- FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. New York, John Wiley & Sons, Inc.1993. p. 1 – 6, 1993.
- FREDLUND, D.G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability functions for unsaturated soil using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v.31, n. 4, p. 533 - 546, 1994.
- GARDNER, W. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. **Soil Science**, v.85, p. 228-232, 1958.
- GONÇALVES, A.D.M.A.; LIBARDI, P.L.; BRAS, R. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 1174-1184, 2013.
- MARINHO, F.A.M. **Os solos não saturados: Aspectos teóricos, experimentais e aplicados**. 2005. Monografia (Concurso de Livre Docência) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2005.
- CAMARGO, D.P.; PIRES, M.V.O. **Confecção da carta de aptidão de fundações de acordo com a proposta metodológica elaborada por Zuquette (1987) para o Campus da UFV – Rio Paranaíba**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Rio Paranaíba, MG, 2015.
- McCARTNEY, J.S. **Determination of the hydraulic characteristics of unsaturated soils using a centrifuge permeameter**. 2007. 388 f. Ph.D. Dissertation, University Texas.
- NETTO, A.A.; FERNANDES, E.J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n. 8, p. 797-802, 2005.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; 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, p. 327-336, 2004.
- SEVERIANO, E.C. **Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2010. 148 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.
- SOTO, M.A.; CHANG, K.H.; VILAR, O.M. Análise do método do permeâmetro Guelph na determinação da condutividade hidráulica saturada. **Águas Subterrâneas**, v.23, p. 137-152, 2009.
- SOUZA, Z.M.; ALVES, M.C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p. 18-23, 2003.
- VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p. 892-898, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M.T.; NIELSEN, D.R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annals of Geophysics**, v.3, p. 615–628, 1985.
- VOLLANT-TUDURI, N.; BRUAND, A.; BROSSARD, M.; BALBINO, L.C.; OLIVEIRA, M.I.L.; MARTINS, E.S. Mass proportion of microaggregates and bulk density in a Brazilian clayey oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, v.69, p. 1559- 1564, 2005.